

特集：大型プロジェクトに学ぶ：航空機エンジン及び発電タービン技術・産業の将来への提言

これまでのガスタービン関連大型プロジェクトから学ぶ

Learning from Past Large-scale Projects Related to Gas Turbines



川口 修^{*1}

KAWAGUCHI Osamu

我が国のガスタービンの研究開発、技術開発は実質的には太平洋戦争の敗戦から数年間の空白期間を経て始まった。しかし、空白期間の海外における航空用、発電用ガスタービンの技術的な進歩、実用化は目覚ましく、それらに追いつくのは並大抵のことではなかった。そこで、当初は基礎研究と並行して各企業では海外のガスタービン企業との技術提携で設計・製造技術の吸収が行われた。そして、各企業における海外技術の吸収が進むうちに国内で自前の技術で実用的なガスタービンを開発しようとする機運が高まり、それを後押しする形で大型の国家プロジェクトが立ち上がった。ガスタービン関連の企業はその資金の助けを借り、国公立の研究機関や大学の協力を得ながらガスタービンの研究、開発を行うこととなった。その結果として、現在では技術的には海外製品に引けを取らぬ、または凌駕するような高性能な事業用、産業用、航空用のガスタービンが開発され、その多くが実用化されて国内外で稼働している。本特集号は、それらのガスタービン開発の国家プロジェクトに関わった方々にその開発から実用化に向けた経緯や、数々の困難を乗り越えて成果を挙げた苦労をまとめて頂いた。

ガスタービンは往復式内燃機関と異なる多くの特徴を持っており、未だに多くの可能性を秘めている。その熱効率の向上には圧縮機、タービン、燃焼器等の各要素の効率向上が欠かせないのは勿論だが、特に努力が傾注されてきたのが熱効率向上に直接関わるタービン入口ガス温度TITの上昇であった。ガスタービンの開発当初は800℃程度であったものが現在では1600℃を超えるタービン入口温度も実用化の段階に入っている。もちろん高温ガスを供給する燃焼器側からすればタービン入口温度を上げるのは比較的容易なことであるが、高温ガスに晒されるタービンの静翼、動翼には耐熱材料を使用するとともに適切な冷却を行い、その耐熱強度を確保することが必須で、その技術開発には多くの努力が払われてきた。そして耐熱合金の開発や製造技術、翼冷却構造の複雑化に対応する精密鑄造技術の開発等に対する地道な努力の

積み重ねが今日の高効率、高性能なガスタービンの実現となって結実している。さらに、近年の厳しい環境規制に対応すべく、ガスタービンの排気に含まれる窒素酸化物をはじめとする大気汚染物質の低減にも多くの努力が払われて事業用発電ガスタービンや航空機用ガスタービンの排気清浄化技術として結実している。

私自身がいくつかのガスタービン関連のプロジェクトの評価委員会等に参加して感じたことは、このような産官学の努力の成果が波及して今日の我が国の高度なガスタービンの技術開発、実用化に繋がっていることが関係者以外には理解されず、プロジェクトの大半が当初の開発目標を達成することなく、資金の無駄遣いが行われたように批判されたことである。各プロジェクトにおいて培われた多くの研究の成果、技術開発の成果は現在実用化されている高効率、高性能なガスタービンに生きていることは紛れもない事実である。また、ガスタービン関連のプロジェクトを通じてガスタービン関連の競合各社の技術者や、大学、研究機関の研究者が垣根を越えて協議を重ね、協力関係を築けたこともその後の高性能ガスタービンの開発、実用化につながった大きな成果と言える。

本特集号ではムーンライト計画における高効率ガスタービンの研究開発とそれに続く高性能ガスタービンの実用化、FJRジェットエンジンの開発とSTOL実験機への搭載運用とその後の航空エンジンの国際共同開発への展開、WE-NETにおける水素燃焼タービンおよびメタン・酸素燃焼タービンの研究開発、それらに先行して或いは並行して行われた耐熱材料の開発から高温タービン翼の精密鑄造技術など、各種の高効率、高性能ガスタービンの設計と実用化に向けて苦労された方々に、その開発経緯や成果を貴重なデータとともに纏めて頂いている。

現在ガスタービンに関わっておられる技術者、研究者には、この特集号を通じてこれまでの各界の研究者、技術者が辿ってきた道を知って頂き、今後の我が国のガスタービンの開発、実用化に役立てて頂きたいと願う次第である。

原稿受付 2016年10月4日

*1 慶應義塾大学 名誉教授

〒203-0004 東久留米市氷川台1-19-15

特集：大型プロジェクトに学ぶ：航空機エンジン及び発電タービン技術・産業の将来への提言

航空宇宙技術研究所におけるFJR710エンジンの研究開発と STOL実験機での搭載運用

Research and Development of FJR710 Engine and its Operation on the STOL Research Aircraft



佐々木 誠^{*1}
SASAKI Makoto

キーワード：ジェットエンジン，ターボファンエンジン，NAL，FJR710，STOL
Jet Engine, Turbofan Engine, NAL, FJR710, STOL

1. はじめに

FJR710エンジンは，通商産業省（現経済産業省）工業技術院の大型工業技術研究開発制度（大型プロジェクト制度）による「航空機用ジェットエンジンの研究開発」として1971年度から11年間にわたって産学官の協力のもとに研究開発が行われたわが国初の高バイパス比ターボファンエンジンである。航空宇宙技術研究所（National Aerospace Laboratory，以下NALと略記，現JAXA）はプロジェクト立上げ当初から本研究開発に全面的に協力し同エンジンを完成させるとともに，その最終型であるFJR710/600Sを同所の低騒音STOL実験機「飛鳥」に搭載し，4年間にわたる飛行実験で実運用に供した。

本稿では，はじめにわが国の航空機用ジェットエンジン研究開発の歴史を展望し，その中でのFJR710エンジンの位置づけを説明するとともに，本エンジン開発においてNALが担当した研究開発およびSTOL実験機におけるエンジン搭載運用の概要を述べ，わが国ジェットエンジン技術の発展において同エンジン開発が果たした役割を振り返ってみる。

2. NAL航空推進分野の研究活動経過とわが国航空機用ジェットエンジン研究開発の流れ^{(1),(9)}

図1はNALの航空推進分野の研究活動経過とわが国の航空機用ジェットエンジン研究開発の流れとを対比して示したものである。松本⁽¹⁾はわが国のジェットエンジン技術開発の歴史を次の5つの時期に分けて展望している。第Ⅰ期は1945年の第2次世界大戦終了までで，わが国初のジェットエンジン「ネ20」を搭載したジェット機「橘花」が初飛行した黎明期，第Ⅱ期は終戦から1952年の航空再開までの7年間で，わが国が一切の航空活動を

禁止された空白期である。

第Ⅲ期は航空再開から1970年までの18年間で基礎技術蓄積の期間である。1955年にNALが設立され，共用設備としてエンジン要素試験設備の整備が進み，当時開発中であった防衛用J3エンジンの要素試験にも活用された。NALは民間の協力の下にJRシリーズ超軽量リフトエンジンの研究開発を推進した。

第Ⅳ期は1971年から1988年までの発展期で，本稿の主題であるわが国初の高バイパス比ターボファンエンジンFJR710の研究開発の開始からNALのSTOL実験機「飛鳥」の飛行実験終了までである。

第Ⅴ期は1979年からであり，国産エンジンの実用化と並行して民間エンジンの国際共同開発への参加が始まり，その成果であるV2500エンジンが成功を収め，その後CF34など多くの共同開発への参加が続いた。一方で「超音速輸送機用推進システムの研究開発」（HYPR）を推進するなど世界の最先端企業と協働出来る状態に達した。1999年からの「環境適合型次世代超音速推進システムの研究開発」（ESPR）や，2003年からの「環境適応型小型航空機用エンジンの研究開発」（エコエンジン），さらには民間資金のみによるビジネスジェット用小型エンジンの自主開発など，現在の状況は新たなフェーズに分類すべきかも知れない。なお，本図には文献⁽²⁾から抽出した防衛用エンジンの研究開発の流れも対比して示した。

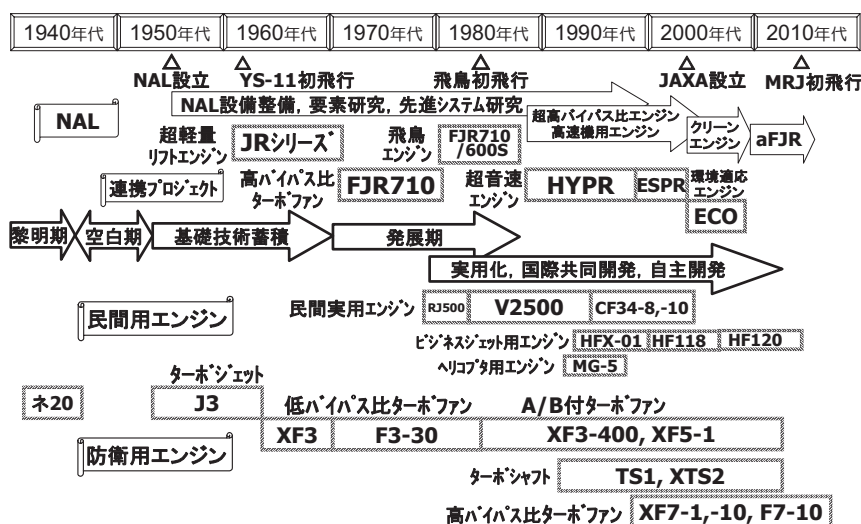
3. 大型プロジェクト制度によるFJR710エンジンの研究開発とNALの役割

3.1 第1期計画⁽³⁾

1971年，旧通商産業省工業技術院の大型プロジェクト「航空機用ジェットエンジンの研究開発」として，わが国初の高バイパス比ターボファンエンジンFJR710の研究開発が開始された。このプロジェクトは，当時の世界動向およびわが国の状況を踏まえ，頻繁な離着陸に耐え，航行時の経済性が高く，騒音および排気による大気汚染

原稿受付 2016年9月5日

*1 元航空宇宙技術研究所
〒201-0003 狛江市和泉本町2-12-1

Fig. 1 NAL's Aero-propulsion research activity with the history of aircraft engine development in Japan⁽⁹⁾

の少ない高性能な推力10から15トンクラスのファンエンジンの自主開発により、わが国の航空機用ジェットエンジン技術の確立を目指したものであった。

第1期計画（1971～1975）では、国内の航空エンジン工業の実情およびNALのエンジン要素試験設備能力や先行研究成果を考慮し、中間目標として推力5トンクラスのエンジンの要素研究と設計試作研究および運転研究を実施することとし、NALと国内エンジンメーカー3社〔石川島播磨重工業（IHI）、川崎重工業（KHI）、三菱重工業（MHI）〕が密接に協力して研究開発を実施した。はじめに1次試作としてNALの先行要素研究成果（フロントファン、高温タービンなど）を活用し、推力4.5トンのFJR710/10を3台試作して運転研究を開始した。次に要素研究成果を取り入れて性能向上を図った推力5トンの2次試作エンジンFJR710/20を3台試作し運転試験により目標性能を達成した。

第1期計画においてNALは要素研究および運転研究を担当し、ファン、高圧圧縮機、燃焼器、高温・高圧タービン、低圧タービン等全ての要素試験を実施するとともにメーカーによるエンジンの設計試作研究を支援した。新たにエンジン運転装置および高圧アニュラ型燃焼器試験装置を整備し実機条件での燃焼試験を可能にした。

3.2 第2期計画

3.2.1 開発目標^{(3),(4)}

第2期計画（1976～1982）では、当初、世界状況の変化から開発目標を推力7トンクラスに設定し、第1期計画の成果を基礎にして低騒音・低公害で総合効率の高いニューテクノロジー・エンジンの技術確立を目標にした。第2期1次試作エンジンFJR710/600の開発を開始した後、メーカー側の国際共同開発への動きや本エンジンをNALの低騒音STOL実験機「飛鳥」に搭載することが決まったことを受けて、開発目標を推力5トンクラスのエンジンの実用化開発に変更し、性能・機能試験、耐久試験、環境適応性試験、高空性能試験等を重点的に実

施してエンジンの安定性、耐久性、信頼性の向上を図ることになった。表1に第2期計画の目標性能諸元を示す。

第2期計画においては、エンジンメーカー3社は航空機用ジェットエンジン技術研究組合を設立してより強力な体制で設計試作および運転研究を実施した。NALはノイズ低減、エミッション低減などの環境適合性研究、インレットディストーションなど耐環境性研究、および新形式ファン、高圧力比圧縮機、高温タービン冷却翼、高負荷タービン、全電子式エンジン制御器（FADEC）、軽量化などの先進要素研究を担当するとともに、メーカーによるエンジンの設計試作と運転研究を支援した。

3.2.2 FJR710/600エンジンの概要⁽⁵⁾

図2にFJR710/600エンジンの断面図を示す。目標バイパス比6.5とし、低速飛行時の燃料消費率の低減を図った2軸高バイパス比ターボファンエンジンである。低圧軸はファン部、低圧タービン部をそれぞれ2軸受で、高圧軸は高圧圧縮機を2軸受で、高圧タービンを1軸受で支持したモジュール構造であり、エンジンは圧縮機前部フレームとタービン中間フレームで機体側に取付け、推力は前部で受ける。ファンは入口案内翼なしの単段で

Table 1 Objective FJR710/600 engine specifications⁽³⁾

項目	目標性能諸元	
騒音	米国連邦航空庁（FAA）のFAR36規制値（Stage 2）－10 EPNdB（機体搭載状態）	
排気	米国環境保護庁（EPA）の1981年規制目標値以下	
	煙	AIA 28
	THC	0.8 kg/(1,000 kgf推力・hr)/サイクル
	CO	4.3
地上静止	推力	5,100 kgf (50 kN)
	燃料消費率	0.37 kg/h/kgf
	高度 7,600 m	1,350 kgf (13.2 kN)
飛行マッハ数 0.75	燃料消費率	0.68 kg/h/kgf
	ファン圧力比	1.45
	バイパス比	6.5
	全体圧力比	19
基準パラメータ	タービン入口温度	1,250°C (1523 K)

あるが内径側にブースト段を設け半径方向に一樣な圧力上昇を得られるようにしている。ファン後流のバイパスダクトとブースト段出口とは流路によってつながっており、加減速時におけるブースト段のサージングとコアエンジンへの異物吸込みを防いでいる。高圧圧縮機は12段で、前4段は可変静翼となっている。燃焼器はアニュラ型で、圧力噴霧型噴射弁とスワローを用いている。高圧タービンは2段で、全ての動静翼に空冷翼を採用している。低圧タービンは4段である。タービン入口温度は最新のタービン冷却技術と燃焼器の性能向上を取り入れて、このクラスのエンジンとしては最高レベルの1,250℃(1523 K)とし、サイクル圧力比はわが国の技術レベルと入手可能材料等を考慮して控えめの値にしている。燃料制御器は油圧機械式でコントロールアンプ(電子式リミッター)を備えている。推力重量比5以上を目標にし、ファン、圧縮機には高力チタン合金、耐熱チタン合金を取り入れ、タービンディスクにはRene95等の耐熱合金を使用し、補機類も新設計により大幅な重量軽減を図った。

3.2.3 耐空性確認試験⁽⁴⁾⁻⁽¹⁰⁾

第2期計画では性能面だけでなく、実用エンジンとしての安定性、耐久性、信頼性の追求が大きな目標であり、FJR710/600型エンジンを3台試作し、性能・機能試験に加えて、長時間耐久試験、耐環境性試験、高空性能試験等を重点的に実施した。表2にエンジン運転試験項目の概要を、表3に一部要素を用いて行われた部分試験項目の概要を示す。これらの開発試験は民間用エンジンに要求される耐空性審査要領の規定(FAR Part33と同等)に準拠し、試験条件の設定に当って搭載機体の想定が必要なものについてはSTOL実験機の飛行条件等を参考にして実施した。補機についてはMIL-E-5007Dに準拠した。図3にNALの試験設備で行われた耐環境性試験(インレットディストーション試験、水吸込試験、雹吸込試験、鳥吸込試験、横風試験、地上着水試験)の状況を例示する。

エンジン高空性能試験および高空着水試験はイギリスの国立ガスタービン研究所(NGTE)で実施され、これに成功したことがその後の民間エンジンの国際共同開発の契機になった。

3.2.4 環境適合性^{(5),(6),(9)}

大型プロジェクト開始当初から環境適合性は重要な

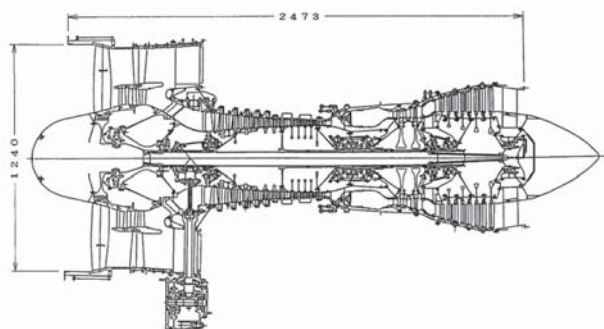


Fig. 2 Cross section of FJR710/600 engine⁽⁷⁾

開発目標であったが、第2期計画では規制強化に対応して騒音については米国連邦航空庁(FAA)の規制値-10dBを、排気ガスについては米国環境保護庁(EPA)の1981年規制目標値以下を目標にした。

Table 2 FJR710/600 engine test items⁽⁷⁾

項目	概要
地上性能・機能試験	定常性能、抽気性能、加減速性能、始動特性
高空性能・機能試験*	高度35,000ft、マッハ数0.9までの定常性能、抽気性能、加減速性能、再着火試験、ウインドミル試験
耐久試験	長時間耐久試験(6時間×25サイクル×連続2回) オーバーホール試験(15分×500サイクル×連続2回)
耐環境性試験	インレット・ディストーション試験(D.I.10%まで) 水吸込試験(エンジン空気流量の4%) 雹吸込試験(1および2インチの氷球各14個) 鳥吸込試験(1.5lbの鳥4羽および4lbの鳥1羽) 横風試験(横風成分20m/sまで) 地上着水試験、高空着水試験*
騒音計測試験	飛行状態を模擬したエンジン騒音計測試験
排気計測試験	排気成分計測試験

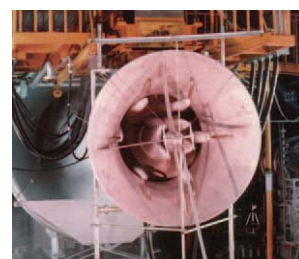
*英国のNGTEで実施

Table 3 FJR710/600 engine component test items⁽⁷⁾

項目	概要
低周波疲労試験	回転部要素に対する8,000サイクル低周波疲労試験
過回転試験	回転部要素に対する122%過回転試験
コンテインメント試験	ファンブレードのコンテインメント試験
全体剛性試験	エンジン静止部組立の剛性試験
補機試験	MIL-E-5007Dに準拠した補機の耐空性、信頼性確認試験
耐圧試験	高圧圧縮機ケーシング、燃焼器ケーシングの最大作動圧力の1.5倍耐圧試験
姿勢変更試験	姿勢変化に対する滑油系統機能試験



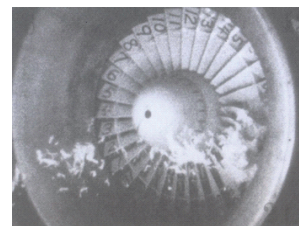
(a) Inlet distortion test



(b) Water ingestion test



(c) Hail ingestion test



(d) Bird ingestion test



(e) Cross wind test



(f) Ground icing test

Fig. 3 FJR710 engine environment tests⁽⁴⁾⁻⁽¹⁰⁾

FJR710/600エンジンの最終騒音計測試験は、NAL角田支所の屋外運転試験場でSTOL実験機の吸音パネル付インテークとナセルを装着し、地上風の影響を最小にするための吸入整流装置（ICD）を使用して行われた。図4に試験実施状況を示す。計測結果を用いて本エンジンを搭載した航空機の騒音予測計算を実施し、大プロ第2期計画の目標値を満足することを確認した。

最終形態についての排ガス計測結果は、炭化水素THCについては目標値を満足したが、煙、COおよびNOxについては満足しなかった。ただし、本プロジェクト終了時点でEPA 1981年規制目標値を満足しているエンジンは世界的にも存在せず、目標値は当時の技術レベルに対し過大なものであったといえる。本プロジェクトの結果は、現実的規制といわれる国際民間航空機構（ICAO）の1983年提案（1986.1.1以降適用）に対しては大幅に良くなっており、世界の水準を超えているものであった。

大型プロジェクト第1期、第2期合わせて9台の試作エンジンにより約4,100時間の運転時間が蓄積された。

4. STOL実験機「飛鳥」搭載エンジンの開発と運用

4.1 FJR710/600Sエンジン⁽⁷⁾

1977年にNALのファンジェットSTOL機の研究が開始され、大プロで開発したFJR710/600エンジンをSTOL実験機「飛鳥」に搭載することになった。搭載用エンジンFJR710/600Sの最大推力4,800 kgf（47 kN）、重量1,090 kg（運転状態）に設定された。USB（Upper Surface Blowing）方式という独特の搭載方式に伴うエンジン機装関連の改修や、合流排気ダクトとエンジンとのマッチング試験、機体用の大量抽気試験、ナセルやフラップとの適合性確認試験、バイパスリップ形状の最適化によるサージ余裕向上と異物（水、鳥）吸込みに対するサージ限界確認試験等がSTOLプロジェクトの一環として行われた。表4にFJR710/600Sエンジン試験項目、図5にエンジンの外観、図6にUSB方式高揚力システム試験の実施状況を示す。

4.2 エンジン空中試験⁽⁷⁾

実験機への搭載に先立ち、実飛行環境下において同エンジンの性能・機能に関するデータを取得し安全性を確認するためエンジン単体の空中試験が行われた。本試

験は防衛庁（現防衛省）のC-1改FTB機の右翼外舷に供試エンジンを搭載して行ったもので、高度30,000 ft、飛行マッハ数0.65までの範囲で、定常性能、抽気性能、加減速、空中再始動、ウィンドミル特性、速度変更、高度変更、大姿勢角保持、機動時特性（横滑り、旋回、Rolling, Push Over）等について、第1次、第2次合計25回の飛行試験が実験航空団の手により行われた（図7）。

その結果、エンジン性能については高空性能試験等に基づく予測結果とほぼ一致する結果が得られ、合流排気ノズル面積の選定が妥当であることが確認された。機能面については、第1次試験においてPush Over操作によ

Table 4 FJR710/600S engine tests⁽⁷⁾

項目	概要
合流排気試験	合流排気ダクトとエンジンのマッチング試験
大量抽気試験	大量抽気時のエンジン性能および機能試験
高揚力システム試験 動力装備試験	USBナセルとエンジンの性能適合試験 主翼上面温度および排気付着特性試験 機体用補機・エンジン機装系統適合試験 インテーク横風試験・インテーク防水試験
サージ限界確認試験	異物吸込みに対するサージ限界確認試験
運転限界向上耐久試験	エンジン運転限界（回転速度、排気温度）実証耐久試験
STOL運用模擬耐久試験	STOL実験機のエンジン運用条件を模擬した耐久試験



Fig. 5 FJR710/600S engine⁽⁷⁾



Fig. 6 USB system ground rig test⁽⁷⁾



Fig. 4 FJR710/600 engine noise test⁽⁹⁾



Fig. 7 FJR710/600S FTB test⁽⁷⁾

る低G飛行条件で潤滑系統にオイル・マイグレーションが発生することが判明した。このため地上において滑油停留原因の究明を行い、滑油の循環を重力に依存しているフロントフレーム・ギヤボックス間の流路に対策を施した上で第2次試験を実施し、健全性を確認した。

4.3 STOL実験機搭載運用^{(7),(8)}

1985年3月に最初の4台のエンジンが岐阜飛行場で実験機に搭載され、全機地上機能試験を経て10月に初飛行した。エンジンは大型プロジェクトにおける耐久試験およびオーバーホール試験の実績に基づき、運転時間150時間または起動停止回数500回のいずれか早い時点でオーバーホールを行うこととし、補用を含め6台の搭載用エンジンによるローテーション運用を行った。

エンジン搭載運用に伴い種々の初期不具合が発生した。これらの不具合はその都度原因を究明し、部品交換、手順変更等の処置を取るとともに、設計に起因するものについては改良設計を適用した。搭載運用開始後の主な改良設計としては、燃焼器フレーム・ディフューザ形状の変更による振動応力の軽減、コントロールアンプの防振支持による信頼性向上、燃料制御器の部品改良、低差圧用カーボンシールの適用などがある。

エンジンの実運用と並行して、搭載用エンジンと同一形態の地上運転試験用エンジンを用いて耐久試験や技術試験を継続実施した。これらは実験機の運用条件を模倣した耐久性の確認、運転限界の向上、運用時に発生した不具合の原因究明、改良設計部品の耐久性確認等を目的としており、飛行実験の遂行に不可欠なものであった。

STOLプロジェクトは4年間約100回の飛行試験を行って終了した(図8)。飛行実験終了時点で飛鳥搭載型エンジンの累積運転時間は3,000時間を超え、大プロを含むFJRシリーズエンジンの総運転時間は7,100時間に達した。そのうち飛鳥搭載運用時間は1,600時間であった。図9にFJR710エンジンの累積運転時間履歴を示す。

5. FJR710エンジンの研究開発を振り返って

5.1 時代の要請に応えたプロジェクト

大型プロジェクト制度によるFJR710エンジンの開発から実験機搭載運用まで一連の研究開発は、わが国のジェットエンジン技術の発展期を代表するものであり、時代の要請に応えるものであった。自主技術の確立にか



Fig. 8 QSTOL ASUKA flight test⁽⁷⁾

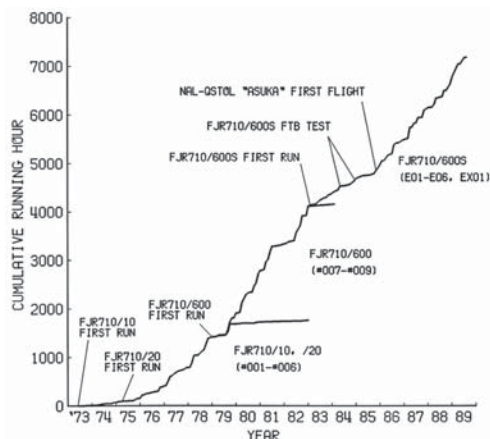


Fig. 9 Time history of FJR710 running test⁽⁷⁾

けるメーカー、研究機関、行政当局それぞれの立場からの熱意がプロジェクトを立ち上げ、成功させ、わが国民間ジェットエンジン技術を実用段階へ押し上げた。エンジンメーカー3社は、本エンジンの開発実績をもとに民間エンジンの国際共同開発に踏み切り、日英共同開発のRJ500エンジンを経て、日英米独伊5カ国共同開発エンジンV2500の成功につながった。

大型プロジェクトによる「航空機用ジェットエンジンの研究開発」は、産業社会の発展に貢献した技術成果として1983年に日刊工業新聞の日本産業技術大賞を受賞した。またFJR710エンジンは2007年に日本機械学会の「機械遺産」に認定された。

5.2 産学官の協力

大型プロジェクトは通商産業省工業技術院の主導の下に国立研究機関(NAL)とエンジンメーカー(IHI, KHI, MHI)が協力して実施した。プロジェクトの推進に当たっては、工業技術院の研究開発連絡会議、同ワーキンググループなどの委員として、学界および産業界の有識者に参加頂き貴重な助言を得た。またSTOLプロジェクトはNALが機体メーカーおよびエンジンメーカーの協力を得て実施した。同様にNALの技術委員会、同エンジン分科会などに学界および産業界から参加頂き有益な助言を得た。実運用事例に基づくエアライン技術者からの助言は問題解決に役立った。

エンジン空中試験は当時の防衛庁実験航空団の全面的な協力により実施された。STOL実験機の飛行実験は航空法11条但し書きによる飛行許可を得て実施した。当時の運輸省航空局からは耐空性立証作業における指摘やエンジン耐環境性試験への立会、技術情報の提供など多くの協力を頂いた。これら関係省庁への協力依頼においては担当者間の信頼関係が基本的に重要であった。

5.3 技術進歩のベースライン

FJR710に投入された要素技術は1970年代のものであり、空力設計も2重円弧翼などの翼列データに基づく古典的な2次元設計手法が主体で、断熱効率もファン・圧縮機85%、タービン88~90%のレベルであった。30年

を経た今日では数値流体力学 (CFD) の援用による3次元設計が中心となり大幅な効率向上が実現している。

タービン入口温度については、TIT 1,250℃での耐久性を実現するためFJR710/600Sエンジンの初段ノズル翼はプロジェクト期間中の研究開発成果を最大限取り入れて、インピンジ冷却、対流冷却、フィルム冷却に加え、部分的なセラミック遮蔽コーティングを適用している (図10(a))。その後の冷却構造の高度化、高温材料の進歩により今日の大型民間エンジンのTITは1,500℃に達しており、さらに上昇の傾向にある (図10(b))。

環境適合性については、FJR710の騒音およびNO_x排出レベルは当時のICAOの規制値を十分満足するものであった。その後の規制値の段階的な引下げにより今日の民間エンジンではさらなる低減が実現している^{(9),(10)}。

燃料制御器に関しては、FJR710エンジンは当時の信頼性の観点から油圧機械式を採用したが、別途先進要素研究として全電子式制御器 (FADEC) の研究開発を行い、わが国初のエンジン装着実証試験に成功した⁽¹⁰⁾。今日の民間エンジンは全て電子式制御器を採用している。

このようにFJR710エンジンは1970年代のわが国ジェットエンジン技術の到達点であり、その後の技術進歩に対するベースラインとして位置づけられる。

5.4 耐空性確認、搭載運用

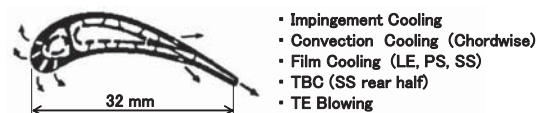
大型プロジェクトでは耐空性審査要領 (FAR Part33 と同等) に要求される全ての試験を実施した。特に水、鳥、雹などの異物吸込み試験や着氷試験はわが国で初めての経験であり、規定の解釈、試験方法・試験装置の開発から始める必要があった。試験方法が適切でないとエンジンに過大な条件を課してしまうことを経験した。エンジン空中試験では低G条件下でオイル・マイグレーションを初めて経験し、滑油系の改修を行うことが出来た。実験機搭載運用開始後の初期不具合に対しては、その都度対策を立て地上運転用エンジンで確認した上で適用した。地上試験で何かしら不十分な芽を残すとそれは搭載運用の段階で必ず現れてくることを実感した。これらの経験はその後のエンジン開発への教訓となった。

5.5 人材の育成、エンジン教育

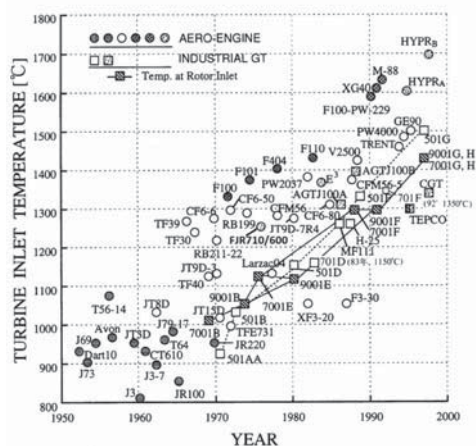
FJRエンジンプロジェクトは民間技術者の育成にも大いに貢献したと言われている。このプロジェクトでエンジン技術を習得し、国際共同開発で成長した多くの技術者がメーカーの幹部として活躍された。また大型プロジェクトの試作エンジンや実験機搭載エンジンは現在JAXAや各地の博物館、大学等に展示され、実物教材として役立てられている。

6. おわりに

FJR710エンジンの研究開発とSTOL実験機での運用についてNALの視点から概観した。参画されたメーカー技術者のご尽力、関係省庁のご協力、学界のご指導に改めて敬意と謝意を表します。30年を経てジェットエンジ



(a) FJR710/600S HP Turbine nozzle cooling



(b) Turbine inlet temperature trend⁽¹¹⁾

Fig. 10 Trend in turbine inlet temperature

ン産業は大きく成長した。産学官の連携による研究開発の進化により更なる発展を期待したい。本稿を草するにあたりJAXA航空技術部門の二村尚夫ユニット長および西澤敏雄チーム長から頂いた助言に感謝します。

参考文献

- (1) 松本正勝, 国産ジェットエンジンの開発, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 28, No. 5 (2000), pp. 346-351.
- (2) 林利光ほか, 防衛庁におけるジェットエンジン研究開発の歴史と将来への展望, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 34, No. 3 (2006), pp. 178-183.
- (3) 岩田誠二, 大型プロジェクト航空機用ジェットエンジンの研究開発, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 4, No. 14, (1976), pp. 10-14.
- (4) 松本正勝, 鳥崎忠雄, FJR710ターボファンエンジンの研究開発の現状, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 8, No. 30, (1980), pp. 13-18.
- (5) 松本正勝, FJR710エンジンの研究開発 (第2期計画), 日本航空宇宙学会誌, Vol. 33, No. 372, (1985), pp. 12-19.
- (6) 鳥崎忠雄, FJR710ファンエンジンの研究開発, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 30, No. 1 (2002), pp. 76-77.
- (7) 能瀬弘幸ほか, FJR710ターボファンエンジンの開発とSTOL実験機「飛鳥」による運用, 日本航空宇宙学会誌, Vol. 38, No. 438 (1990), pp. 333-341.
- (8) 佐々木誠ほか, STOL実験機「飛鳥」のエンジン開発, ターボ機械, Vol. 18, No. 8, (1990), pp. 475-481.
- (9) 佐々木誠, NALが関わったYS-11開発とそれ以後の航空分野研究開発 (7/8) 推進分野 (その1/その2), 航空技術, No. 634/635, (2008), pp. 56-61/48-53.
- (10) 航空推進研究センター, 航空エンジン研究50年の歩み, 航空宇宙技術研究所, (2003), pp. 35-55.
- (11) 吉田豊明, 高温・高効率化の歩みと展望 (5) 冷却技術, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 25, No. 97, (1997), pp. 29-34.

特集：大型プロジェクトに学ぶ：航空機エンジン及び発電タービン技術・産業の将来への提言

石川島播磨重工におけるFJRジェットエンジン開発とV2500エンジンへの実用化

Research of FJR710 Jet Engines and Development of V2500 Engine in Ishikawajima Harima Heavy Industries



勝又 一郎^{*1}

KATSUMATA Ichiro

キーワード：ガスタービン，ジェットエンジン，原動機，航空機，民間航空機

Gas Turbine, Jet Engine, Prime Mover, Aircraft, Civil Aero Engine

1. 緒言

私が、石川島播磨重工（以下IHI）に就職したのは1970年、FJRジェットエンジンのプロジェクトのスタートと同時であった。大学院の研究室では伝熱工学を専攻していたが、数年間浪人だった通産省大型プロジェクトへの採用が決まったとの知らせを聞いて、急遽就職先を変更したことを覚えている。純国内技術で民間航空機用エンジンの開発を国家プロジェクトとしてほぼ10年間続けられると云う企画は、当時としては最高の夢であった。それから40年間、どっぴりと大型航空機用のエンジン開発に携わることができたことは、望外の幸せというほかはない。今回図らずも「当時の研究開発状況を振り返って紹介いただくとともに、プロジェクト終了後の技術開発、実用化への経験などを踏まえて、ガスタービン技術と関連産業の将来の発展のための提言を」との依頼を受けて、快諾をさせていただいた。その理由は、40年間の成功と挫折の中から得られた多くの教訓を語る機会を得られたからである。

FJR710ジェットエンジン開発の概要は、既に多くの方が学会誌に投稿されているので、ここでは省略をさせていただく。唯一紹介をしたいのは、産官学の協力体制がプロジェクトの全期間を通じて、まったくゆるぎなかったことが、成功の最大の原因だったと思っていることである。特に重工3社（IHI、川崎重工-以下KHI、三菱重工-以下MHI）の技術面での協働体制はSingle Companyと云えるほどのものであった。私は、設計とその周辺技術の調整と取りまとめ役（システム設計班長）であったが、流体力学はIHI、熱力学はMHI、構造強度はKHI、材料選択とスペックは3社合同の委員会など、各社の研究所も含めた総力を盛り込むことができたと信じている。

原稿受付 2016年7月4日

*1 日本経済大学大学院 メタエンジニアリング研究所
(自宅) 〒157-0062 世田谷区南島山4-5-1

プロジェクトの最終仕上げとなった英国で行われた高空性能試験の大成功の直後に、Rolls-Royce社（以下RR）から50対50の共同開発の提案を受けて、RJ500の国際共同開発がスタートした。その時は、まだSTOL機による飛行試験の期間中であつたが、私はこちらの技術作業調整との掛け持ちになった。そこからV2500（日米英独伊の共同開発）でのChief DesignerやGE90（日米仏の共同開発）でのChief Engineerなどを経験したのであるが、本報告ではこの間に得られた多くの教訓の中からいくつかを述べさせていただく。

なお、表題は国内の慣例に従って、「FJRジェットエンジン開発とV2500エンジンへの実用化」としたが、世界で通用する言葉で表せば、「FJR710によるジェットエンジン研究とV2500エンジン開発」が正しい。

2. 教訓の概要

初期の国際共同作業を通じて得た感想は、「このまま行けば、20年後にはBig3（General Electric-以下GE, Pratt & Whitney -以下PWA, RR）に追いつき、30年後には日の丸エンジンを搭載する機体が生まれるであろう」ということであつた。紙面の都合ですべてを語ることはできないのだが、順不同でいくつかを紹介してゆく。

- ・ Lesson1: 研究と開発は全く異なる[1979]
- ・ Lesson2: 手段の目的化をしてはならない[2000]
- ・ Lesson3: 製造技術だけなら勝つことができた[1974]
- ・ Lesson4: 特許論争でも勝つことができた[1975]
- ・ Lesson5: 設計技術だけなら勝つことができた[1980]
- ・ Lesson6: 実験装置でも勝つことができた[1977]
- ・ Lesson7: 品質管理の文化の問題[1998]
- ・ Lesson8: 価値工学の価値は大きい[2002]
- ・ Lesson9: 商品としての差[1979]
- ・ Lesson10: 世界中のエアラインの特徴を把握[1980]
- ・ Lesson11: 試験用エンジンを早く組み立てる[1982]
- ・ Lesson12: リベラルアーツは常に重要[1979]

3. Lesson1；研究と開発は全く異なる

(Rolls-Royceから最初に言われた言葉 [1979])

共同開発を始めるにあたってRRから最初に言われた言葉は、「あなた方は、FJR710エンジンで大成功を収めた。そのことはよく知っている。しかし、あれは研究用であり、これから我々が設計するのは開発用である。その違いを関係者全員で明確に認識してほしい」であった。

このことは至極当然で、目的が全く異なり、開発用は①競合機種に勝ち顧客に選ばれること、②材料調達を含めて大量生産が連続して長期間可能なこと、③事業全体で収益をもたらすこと、④中古機も含めて40年間以上性能を保ち続けることなどが要求される。

ちなみに、基本設計によるエンジン全体の断面図が完成された後で、最初に行われたレビューは、整備技術のベテランチームとの丸2日間の会合であった。従来エンジンの整備上での問題、世界各国のエアラインから寄せられた要望が、次々と出されて議論の対象になった。おおむね9割は設計陣により拒否されるのだが、会合の後でも、あきらめきれずに「日本側の設計では是非これだけは盛り込んでほしい」との要望がいくつか話された。

日本では、「研究開発」という言葉で、ひとくくりに言われることが多いのだが、企業間競争の中ではこの違いを明確に認識することから始めなければならない。研究と開発を同時に進めると、両方ともに中途半端な結果しか得られない。

また、研究陣から研究が完成したと言われても、直ちに開発品に採用することは大いに危険である。どうしてもその成果を必要とする場合には、バックアッププランを常に並行して進めなければならない。生まれながらのグローバルマーケット商品の航空機用エンジンには、必ず競合機種が存在する。勝つためには、最新の成果の導入は不可欠であり、バックアッププランは、その後の経験でも常に実行された。

4. Lesson2；手段の目的化をしてはならない

(エンジンか要素か [2000])

技術の世界でも「手段の目的化」が、大なり小なり頻繁に行われてしまう。特に、日本が得意とするTQM (Total Quality Management) の世界では、このことが起こりやすい。FJR710の目的は、機体に搭載するエンジンの開発能力を身に付けること、であった。しかし、時代とともにこの目的のための手段である、要素開発や高品質の部品製造などが目的化されて、当初の目的が忘れられてしまったように感じられる。多くの事情によりそのような方向にそれたのだが、やはり当初の大目的に対して、達成までの確たる戦略が存在しなかったと言わざるを得ない。戦術の推進が得意な日本の技術者は、つい戦略の共有をおろそかにする傾向がある。

V2500の開発期間中には毎回の試験エンジンの運転後に何百という不具合が見つかった。そのたびに5か国の

Chief Designer会議で対策案が検討され決定される。回を重ねるごとに日本案が採用されることが多くなった。そのことは、日本の技術者が戦術にたけていることを示すものだと考えられる。しかし、その時にイタリアチームの友人がささやいた言葉が印象的だった。「我々は、目先の対策の立案では日本人にはかなわない。しかし、我々には戦略があるので、最終的には我々が勝利することになる。」

確かに、第2次世界大戦、近年の海外派兵問題、サミット対応などを見ると、歴史的にもその言葉に納得せざるを得ないものがあつた。

5. Lesson3；製造技術だけなら勝つことができた (Howmet vs.小松製作所 [1974])

FJR710の当初から、私は高圧タービン設計チームの班長も務めた。エンジンの性能達成のためには、タービン入り口温度を、従来の実績よりも100℃以上高めなければならない。このことは英米でも同じで、米国内でも多くの大学でタービン翼の冷却法の基礎研究が行われ交流も活発であった。年1回の学会の場に限らず、各大学主催のワークショップで研究者の最新情報が交換された。私は、ミネソタ大学とスタンフォード大学の常連となり、発表¹⁾を通じて多くの友人を得ることができた。

共通する最大の問題は、第1段タービン翼のリーディングエッジの冷却法で、インピンジメント冷却とフィルム冷却の併用が不可欠とされていた。当時の技術では、双方の孔は表面からの放電加工で行われたが、それでは、インピンジメントの噴流力が、フィルム冷却孔に直接あたることになり、冷却効果は十分に発揮できない。そこで、インピンジメント冷却孔を鋳造で作ることが必要になる。

私は、この設計を大阪の小松製作所に持ち込んだ。彼らには、それまでも何度も航空宇宙技術研究所（以後NAL）との共同で精密鋳造を依頼していた。彼らの判断は、「考えられるが実行は難しい」であった。そこで、世界一の精密鋳造技術を持つ、米国のHowmet社にその設計図を持ちこみ議論を重ねることになった。彼らの回答は、「セラミックコアの製造が不可能で、鋳込み時にコアが折れてしまう。結論はImpossible」であった。

帰国した我々は、「世界一の会社ができないことにチャレンジしてみよう」であった。幸い、FJR710の予算にはその余力があつた。最初の歩留まりは1%くらいであったが、それでもImpossibleではなかった。この冷却翼設計はFJR710/10と、それに続く/20の実機翼を用いた要素試験で続けられて、遂に鋳造品の歩留まりも実用レベルになり、FJR710/20の運転試験は目標値のタービン入り口温度を達成することに成功した。

産官学の協働が、米国の世界一の製造技術を追い越した瞬間であった。しかし、このような無謀とも思われるチャレンジ精神は、その後のプロジェクトでは次第に失

われ、より堅実な方向に向かってしまったように感じられる。しかし、当時はこれだけでは終わらずに、次の特許論争にまで発展した。

6. Lesson4；特許論争でも勝つことができた (General Electricとの特許論争 [1975])

FJR710/20が行われていた時代は、すでにBoeing747ジャンボジェット機などの最盛期で、オーバーホールなどから、実機のタービン翼の冷却構造なども明らかになってきた。そのようなときに、以前に提出していた精密鑄造の冷却構造の特許が審査の時期を迎えた。

それ以前にも、いくつかの特許を提出していたが、特に問題はなかったが、これに関しては特許庁から「異議申し立てがありました」との通知が来た。内容から異議の申し立てはGEからのものであることは明白だったが、私は彼我の違いを説明する回答書を直ちに送った。しかし、再度の異議申し立て書が送られてきた。そのような往復が3回は繰り返されたと思う。そして、最終的には「冷却性能の飛躍的改善は伝熱工学的に明らかなので、その他の部分にGE社の特許と同じ構造が含まれていても、全体としては明らかに新発明である」との意見が採用されたようであり、めでたく登録された。

この特許の冷却構造は、以降の多くのタービン翼に应用されているのだが、金銭的な収入には至らなかった。しかし、たとえGEが相手であろうとも、とことん議論を尽くしたこの時の経験が、以降の国際プロジェクトのV2500とGE90では大いに役立った。意見が対立するときには、まずは反論をすること。それに対する反論にも、更に反論を返すこと。少なくとも3回はこれを繰り返さなければ、お互いの力を理解し合うことはできない。そして、国際共同開発プロジェクトにおいては、この「お互いの真の力を見極めること」が、真の協力体制を築くうえで最も重要なことの一つである。

ソクラテスが弟子のひとりとの会話の形で「正しいこと」を論じた内容がプラトン全集⁽²⁾に示されているので引用する。

『ソクラテス「正しいことと不正なこととの場合はどうなんだろうね、いったい。答えてみたまえ」

弟子「できません」

ソクラテス「論ずることによってだ、といてくれたまえ」』

つまり、「正しいことは、知識の集積による議論により導き出されるもの」と明言している。この言葉は、「正しいこと」は普遍ではなく、時代とともに変わってゆくことも同時に示している。

7. Lesson5；設計技術だけなら勝つことができた (Rolls-Royceとのタービン基本設計 [1980])

エンジンの基本設計は、全体性能が決まった後の各要素のパラメータ・スタディから始まる。特に、最後尾の

低圧タービンは、最後のつじつま合わせの機能があり、パラメータの変動範囲が広い。RRのタービンチームと数週間にわたってこの作業が行われた。未だ、インターネットはおろか、ファックス通信もままならぬ時代で計算はRR任せだったのだが、どう考えてもおかしな傾向が表れていた。数回異論の理由を説明したが、RRの回答ははかばかしくなかった。しかし、ある時「社内の計算式のプログラムにミスがあった。あなたの主張は正しい」といって新たな結果を持ち出してきた。議論は無事結論を得て、設計パラメータはすべて決まった。なんと、分子に入るべきレイノルズ数が分母に入っていたのには驚いた。

その後も、各分野で基本設計が進められたが、日本側の担当者は皆若く、修士課程などで最新の解析手法を身につけた者ばかりで、議論は伯仲した。しかし、最終的には経験が判断を決める場面も多くあった。エンジンは、最低でも40年間は規定通りの性能を安全に保たなければならない。40年間にどのような想定外のことが起こるかは、経験でしか知ることのできないことなので、当然のことにも思える。

しかし、1989年のベルリンの壁崩壊で状況は一転した。このとき、丁度Boeing777用のエンジンである世界最大サイズのGE90の開発が始まった。日本を除くその直後の世界の航空機産業の落ち込みは、すさまじいもので、多くのベテランがBig3から去ってしまった。一方で、日本側3社では優秀な技術者の入社が続いていた。

GE90の最大の問題は、目標とした世界最高の推力重量比をいかに達成するかであった。当時のGEの設計は、すべてがマニュアルに示されており、現役世代にとっては金科玉条であり、そこから外れることは許されなかった。GEには、超ベテランのThe Chief Engineerと呼ばれる万能技術者が数名存在していたが、当時はそれもただ一人に減り、しかも彼は後継者の指名ができずに悩んでおられた。

推力はサイズの二乗、重量は三乗で効くので、GE90の目標推重比の達成は従来のマニュアル通りでは不可能であることは自明だった。そこで力を発揮したのは日本の若い技術者たちで、最新の破壊力学や構造解析を提案して改善に寄与した。しかし、まだ足りずに新材料のチタンアルミナイドという金属間化合物合金を急遽低圧タービン翼に採用しようとの動きが始まった。この新材料の特許はIHIが保有しており、GEの材料専門家との会合が頻繁に行われることとなった。GEも独自の成分の特許を取得し、双方の特性の比較が行われることとなり、最後には実機による試験まで行われた。この間の詳細は割愛するが、これらの経験を通じて設計解析に用いる新たな工学的知見や新材料の設計に関しては、日本の技術はBig3を上回るとの確信を得た。そして、残る経験の問題も徐々に蓄積が進み、技術全般に関してもBig3に大いに近づいたとの感覚を得ることができた。

8. Lesson6；実験装置でも勝つことができた (NASAとの熱疲労試験機比較 [1977])

実機翼の製造が安定したのちには、冷却翼の熱疲労解析が重要なテーマになってきた。エンジンの高温部の部品は、離着陸時に降伏点をわずかに超える応力が発生する。したがって、大部分の部品寿命は低サイクル疲労で規定される。第1段タービン翼は高温なのでクリープとのラチェット解析が必要だが、航空機用エンジンの場合には最高温度での運転時間は短いので、熱疲労が圧倒的に大きくなる。

熱疲労試験機は、定格の圧縮機出口温度の冷却空気を翼内に流しながら、最高時とアイドル時のガス温度の流れの中を翼列が往復する機能が要求される。周囲との輻射熱の影響を低く抑えるためには、供試翼を3枚としても、全体では9枚以上の翼列が必要になる。

IHIの試験機は下町の町工場で作られた。二つの風洞と翼列部以外の全体構造と往復駆動装置は全面的に彼らの技術にお願いした。その後、同じ実験結果がNASAのPaperで発表され、私は手紙の往復からLewis Research Centerへの訪問が許可されて、単身クリーブランドに向かった。そこで間近に見た彼らの試験機は、翼枚数も駆動の早さも明らかに町工場製に及ばないものだった。

学会で発表される内容は、ともすれば組織名が評価を決めてしまうのだが、個々の実験装置の内容まで精密に検討しなければ、真実は分からないとの教訓を得て、以降はNASA Paperへの評価が慎重になった。

9. Lesson7；品質管理の文化の問題（経験と理論が半々の世界 [1998]）

品質管理は、航空機関連の事業にとっては最重要な技術のひとつである。この技術は第2次世界大戦中に米国でQuality Controlとして開発された。空中戦で圧倒的な強さを発揮していたゼロ戦に対抗するために、安全な高空から編隊で一気に急降下攻撃をかけるために、性能が均一なエンジンを大量生産するためのものだったと言われている。IHIの大先輩は、戦後まもなくGHQでこの教育を受け、その時の話を伺った覚えがある。

Quality Controlは、日本では品質管理と訳され日本の勤勉な文化により大発展を遂げた。しかし、そこには一つの問題が潜んでいた。本来Controlとは、ばらつきが存在するものに対して、ある許容範囲に収めるべく調整をしてゆくことであろう。しかし管理と訳したために、ばらつきは可能な限り小さくすること、規定を完全順守することなどが目的となっていった。一般には、これで問題はないのだが、ジェットエンジンの製造の世界ではいくつもの問題が潜んでいる。その事例を紹介したい。

第1段タービン静翼は、複雑な冷却構造と交換を容易にするために一枚ずつのセグメントにする設計が行われた。その時の問題は、隣どうしのシュラウドの間から冷却用の空気が漏れることで、その防止のための工夫が施

される。材質はコバルト合金の場合が多く、超難削材（実際には研磨）である。そのためにシュラウド幅の寸法公差は、生産技術からある範囲が要求された。しかし、製造が繰り返されるうちに、製品寸法のばらつきは小さくなっていった。設計の仮定は、製品寸法は公差内で正規分布をするである。しかし、すべての幅が小さめに偏ると、隙間が空き過ぎ冷却空気が漏れてしまう、逆に大きめに偏ると、隣どうしがぶつかり合って、規定の半径に収まらなくなる。この場合には、追加工で直すことが可能なのだが、大きめに偏ることは、次に示す大きな問題を引き起こすことになる。

機械加工の実力が増して、多くの部品が公差内のある寸法での加工が可能になった。すると、加工時間の短縮と、工具の摩耗量を減らすために、寸法公差内ぎりぎりで加工をストップすることになる。つまり、すべての部品が大きめになってしまう。もちろん寸法検査は合格である。しかし、そのような部品を組み立て、エンジン総重量を計測すると、許容範囲を超えてしまう。慌てて分解をして、大型部品を最軽量のものに入れ替えなければならない。

同様なことに起因した事故が発生し、原因究明を行った経験がある。事故はエンジン屋が最も恐れる、In Flight Shut Downであったために、念入りに行われた。原因は、オイルポンプのシールリングの寸法であった。三重のリングの外径が、すべて公差ぎりぎりの大きめにできていた。ゴム製のリングは、使用しているうちに微量のオイルを吸収して膨潤し、かつ硬くなる。飛行中にポンプが固着して、安全設計が作動してギアボックスから切り離されたのだが、エンジンオイルの供給が突然ストップしたことにパイロットは1分以上気づかなかった。そのためにエンジンのメインベアリングが固着してしまった、というわけである。

経験と理論が半々の世界についても、苦い経験がある。 casting品には欠陥がつきもので許容欠陥サイズは、設計ごとにこまごまと設定される。従来は経験値が主であったが、破壊力学による詳細検討で、使用中に徐々に拡大する欠陥寸法が算出されて、許容範囲をより厳しくすることになった。当時は、タービン翼の castingの多くは米国の限られた会社で行われ、そこから全世界に供給されている。そこで、IHI向けだけの許容基準が厳しくなったわけである。当然、国内での受け入れ検査時に不良品が多く発見されることとなった。そのたびに、品質管理の担当が現地へ出向き、指導を行うのだが、一定期間のうちに再発が繰り返されることになる。この問題の正解は難しいのだが、理論と経験が半々ということの意味を熟知していれば、起こらなかったであろうと推察する。

10. Lesson8；価値工学の価値は大きい (Rolls-RoyceのDirectorとの議論 [2002])

新製品開発にもちいられる原価企画と原価管理は、現

在では日本のお家芸の一つになっているのだが、元はGEのマイルズが発明したVA (Value Analysis, 価値解析) とVE (Value Engineering, 価値工学) である。しかし、1970年代にトヨタがこの手法を原価企画にまで発展させ、日本の高度成長にも大いに貢献することになった。だが、その基本の部分ではまだGEに一日の長あり、専門家のOBを招いての集中講義を受けた。中でも、この手法のおおもとである調達方法のノウハウについては、多くを学ぶことができた。当時のGEは、あのジャック・ウェルチの全盛期で、調達戦略もMDP (Market Driven Procurement) からVJP (Value Justified Procurement) へ大幅にシフトをしており、その方法論を詳しく学び、かつ応用することができた。また、シックスシグマやCOE (Center of Excellence), BPR (Business Process Re-Engineering) についても、GEの専門家との直接の会合を通じて、国内では得られない貴重な最新ノウハウを得ることができた。これらの手法はいずれも基本的には価値解析の考え方の応用なのだが、ここでは詳細を割愛する。

この経験は、後にRRの幹部の知るところとなり、コスト低減、調達戦略、人材育成と組織改編など広範囲にわたる総合的な技術者の在り方についての会合にまで至った。

何事についても、学会等で得られる知識は表面的であり、危機にあたって真に役立つものは基本的な考え方であり、そのことは苦楽を共にする国際共同開発を通じて得られる。グローバル経済社会にあって、新製品を開発し量産で成功するまでの過程では、必ず危機的な状況が数回は訪れる。その際、それを乗り切るノウハウなしには、存続はあり得ない。

蛇足ながら、価値解析の手法は通常の会議でも大いに役立つ。多くの議題に多くの選択肢があり、決定に時間がかかるときには、まず基本機能に関することと、補助機能に関することを分ける。不思議なことに多くの場合に前者は三分の一になるので、それを片付ける。次に、補助機能を基本機能に対して必須のものとそうでないものに分ける、これはほぼ半分になり、後者は忘れることにする。この分類方法はVEの基本なのだが、会議に限らず多くの場合に応用が効く。

11. Lesson9；商品としての差はMaintainabilityでつく [1979]

大型の機体の場合には、複種類のエンジンを搭載できるようにすることが、当時の一つの常識であった。V2500のライバルは、先行するGEチームのCFM56エンジンであった。当初の戦略は、「燃料消費率と騒音レベルで絶対に優位に立つ」であり、その条件を満たす設計は可能であった。しかし、毎月行われる世界中のエアラインとの商談は、数回のエンジン試験で性能が実証されるまでは連敗が続いた。開発試験も後半になると、少し

ずつ受注が取れるようになったが、そうなる競合エンジンは性能の改善を発表した。

ジェットエンジンの世界では、このような言葉がある。「この業界のcompetitivenessというのは、結局はシーソーゲームで何時の時点で見るかにより変わる。明らかに差が出れば売れなくなるので必然的に同じレベルに近づいてゆく傾向にある」

実際の売価や支払い条件でも接戦が続くと、最後には整備性の比較が精密に行われる。エンジンの整備費は膨大で、ライフタイムを通して支払われる総費用は、価格の数倍になるので、エアラインがエンジンを選択する際の大きな要因と考えられている。

整備性は、初期の設計思想で固められるのだが、後からの変更は他の特性と異なり、容易に改善をすることができない。機上で部品交換が可能な範囲、主要モジュールの取り出し方法と部品交換サイクルの同期、高温部品の寿命、分解組み立てに必要な特殊治工具などは後からの変更が難しい。FJRの場合には、一切問題とならなかった観点であり、このための主要なノウハウは長期間の自身の経験と、世界中のエアラインからの様々な意見からのみ得られるものである。

12. Lesson10；世界中のエアラインの特徴を把握する [1980]

V2500の前に、RJ500のプロジェクトがあった、一切ののれん代無しに日英で50対50で進めようという、野心的な契約が交わされた。その第1陣のリーダ役として派遣された私は、マーケティングに始まるすべての部署のオリエンテーリングを受けた。

大型航空機用のエンジンは、生まれながらのグローバル製品である。世界中のすべての国のエアラインが顧客の候補であり、一旦運航が始まれば、世界中のすべての空港での離着陸が行われることを配慮しなければならない。駐機中に問題が発生すれば、その場で直さなければならない。したがって、設計者は世界中のエアラインで起こりそうな問題を、できるだけ知っておく必要がある。たとえ中古機であっても、事故の原因がエンジンにあることは許されない。例えば、「英語のマニュアルが正確に読むことのできない空港でも、整備上のヒューマンエラーが生じない設計を考えること」、「日本人の手は小さく、指も細いが、世界にはグローブのような手を持った人種の国もある。そのようなところでも、on wingの整備で必要な個所には、手が入らなければならない」などであった。

また、エンジン会社よりもエンジンの詳細に詳しいエアラインがある。ドイツのルフトハンザ航空だそうだが。「彼らの最新かつ広範囲な知識も、身につけなければならない。その情報は、マーケティング部門からもたらされる」も貴重な教えだった。

このように考えてゆくと、日の丸エンジンのスタート

には、重要なものの多くが抜けていることが自ずと分かってくる。

13. Lesson11；試験用エンジンをいかに早く組み立てるか [1982]

いよいよ最初の共同設計の成果であるRJ500の組み立てが日英双方で始まった。初号機は勿論RR。2号機のIHI瑞穂工場でのスタートは約1ヶ月遅れの計画だったと思う。

途中で問題が起こった。FAN ROTOR MODULEでバランスが旨くとれないのだ。設計は、機上でFANやLPC Moduleだけの交換が自由にできるように、小さなStub Shaft (Fan RotorとLP Shaftをつなぐ短い軸)にLPCサイズのDUMMY WEIGHTを付けてバランスをとることを要求している。これが、日英双方の現場でトラブったのだ。結局解決策を見つけたのは、瑞穂工場であった。問題解決の場面で設計と現場とのコラボレーションになると、圧倒的に日本チームが強い。

更に、計測ラインの取り付けでも同様で、当時のRRが最も恐れていた、2号機が先に運転場に運び込まれる事態となってしまった。結果は、同じ週の数日違いでRRが面目を保った。めでたし、めでたしであった。

14. Lesson12；リベラルアーツは常に重要 [1979]

1979年3月から、共同開発期間において技術と設計の作業をどのように進めるかの会議が始まった。我々は、FJR710のエンジンを10年間で4種類すべてを成功裏に運転した直後であったが、RR流のやり方をとことん吸収すべく取り入れられるものはすべて取り入れることにして会議に臨んだ。会議は一日に数回、連日行われた。

最初は、会議に使うノートである。ほとんど全員がA4サイズの2センチほどの罫線の入った分厚いノートを持ち歩いている。ファイル用の孔が明いており、一枚ずつ破って別々のファイルに保存する。したがって、持ち歩くのは、だんだん薄くなる何も書いていないノートだけになる。会議の冒頭で、私は先ずこのRR式ノートを差し出して、相手の名前を書いてもらった。(これも教訓の一つ) 親切な人は、自分の周りの組織図まで書いてくれるので、かなり合理的だった。以来、私は従来型の日本式ノートを持ち歩くことはなくなった。

午前9時、B J Banerjee氏と執務室の正確なAddress (Whittle House Room W1-G4) などのTechnical Systemの話から始まった。続いて、10時から設計に使う様々な単位の話、10時半からはFan部分の性能の話、11時半からはHP Compressorの性能の話、といった具合に矢継ぎ早に攻めてくる。相手は、次々に代わるのだが、こちらは連続である。幸い、一度にすべてではなく、段階的に話を進める術を心得ているようで、中身は良く理解できたように思う。また、専門外の余談が常にあった。

これが、その後数十年間にわたって続く(私の場合だ

けでも、10年間で約1000回)、RRとの開発設計に関するEngineering Meetingの始まりであった。パラパラと当時のRR式ノートのファイルを捲ってゆくと、日本に居ては決して聴けないような話が至る所に出てくる。エンジン設計は、知識と経験が半々に必要であるとの認識を初めて持つことになった瞬間であった。

ここ数年、大学教育を中心にリベラルアーツ教育の重要性が注目されて始めている。

設計時に用いられるのは自然科学の知識が主と思われるがちであるが、実は人文・社会科学や哲学的な思考がより重要である。重力という自然の基本的な原理に逆らって、半世紀近くも絶対安全性を確保し続けることは、その間に起こる可能性のある潜在的な要因をすべて配慮する必要がある。直ちに人命にかかわることなので、想定外という言葉は通用しない。

国際共同開発では、業務外の付き合いも長時間多岐にわたる。お互いの歴史や文化(特に伝統文化で現在まで続いているもの)、さらには政治的な考え方も理解しなければならない。英国での共同作業中にフォークランド紛争や湾岸戦争が勃発した。サッチャー政権が誕生し、終焉を迎えた時も会食での大きな話題になった。リベラルアーツ面での深い相互理解がなければ、何回も訪れる危機を無事脱することはできない。

結言

福島第1原発事故や笹子トンネルの天井板崩落事故などを知ると、常にエンジンの設計が蘇る。前者では想定外という言葉、後者ではメンテナンス不良という言葉は、エンジンの設計では最も重要視されて配慮が払われる観点である。新エンジンの設計と開発には、計画段階を入れるとほぼ十年を要する。その間に必要とされる知識は、大学での教養学部と工学部のすべての科目にわたっていた、というのが実感である。FJR710の成功から半世紀が過ぎようとしているが、当初の日の丸エンジンが世界の空を飛ぶ夢(本来の目的)は果たされていない。限られた紙面であったが、実体験から得られた12の教訓の概略を述べた。すべては部分的な勝ちであり、全体的な勝利にはほど遠いものであったと反省をしている。最終目的に対する確固たる戦略の関係者全員による共有が明らかに足りなかったためであろう。

なお、ターボ機械協会が特集した「我が国における流体機械開発研究の将来」⁽³⁾に、より包括的な拙文を発表した。また、私的なブログ⁽⁴⁾を2つ公開中です。併せてご参考いただければ幸いです。

引用文献

- (1) Katsumata, I., Effect of Mach Number on Cooling Effectiveness of Film Cooled Turbine Blade, The Film Cooling Work Shop, Univ. of Minnesota (1975).

- (2) 山本光雄, プラトン全集 第10巻, (1975), p. 269, 角川書店.
- (3) 勝又一郎, 航空機用エンジンの研究と開発における, むかし・いま・これから, ターボ機械, Vol. 38, No. 1 (2010), pp. 21-25.
- (4) 「ジェットエンジンの設計技師」
<http://blog.goo.ne.jp/hanroujinn67/c/175586cbcdedff6c2cc8f75c78878232>
「sonobakougaku」
<http://sonobakougaku.seesaa.net/article/440689282.html>

特集：大型プロジェクトに学ぶ：航空機エンジン及び発電タービン技術・産業の将来への提言

高効率ガスタービンプロジェクトと航技研における研究開発

Advanced Gas Turbine Project and R&T in National Aerospace Laboratory, Japan



坂田 公夫^{*1}
SAKATA Kimio

キーワード：高効率ガスタービン，ムーンライト計画，コンバインドサイクル発電，中間冷却再熱サイクル，パイロットプラント，高温タービン，超耐熱合金，セラミックス，全面フィルム冷却翼，メタン燃料
Advanced Gas Turbine, Moonlight Project, Combined Cycle Electric Power Generation, Intercooled Regenerative Cycle, Pilot Plant, High Temperature Turbine, Super Alloys, Ceramics, Full Coverage Film Cooling, Methane Fuel

本稿の執筆依頼を受けた時は、私の頭の中に当時のガスタービン技術開発と省エネの活動、そして幅広い民間技術者との熱い交流などの記憶が鮮やかに、実に懐かしく蘇ってきた。その執筆依頼を喜んでお引き受けした。そこでこの解説では、ムーンライト計画と名付けられた省エネ技術の研究開発の中の最大プロジェクト「高効率ガスタービンの研究開発」について、研究開発活動の公的な事柄を伝えるとともに、私個人および当時の航技研を取り巻いていた、活動、人々、熱気、悩みや喜びなどを、私の目を通して見た姿として、振り返って見たい。既に老境に入っておられる諸先輩、同輩の皆さんとは、旧聞のご確認を願い、若い方々には大きな足跡を残した大型国家プロジェクトの醍醐味の一端をお伝えしたいと思う。

1. ムーンライト計画と高効率ガスタービン研究開発

1.1 ムーンライト計画全般

ムーンライト計画は、1978年から1993年に当時の通産省工業技術院で実施された省エネルギー技術研究開発計画であり、新エネルギー技術研究開発の「サンシャイン計画」とペアになって推進された。1973年の第1次と1979-80年の第2次の2波に亘って世界を襲ったオイルショックを受けて、エネルギー利用効率向上、エネルギー供給システム安定化、エネルギー有効利用の各要求に対応する技術開発を目指した大型プロジェクト計画である。計画は表1に示す通り、6プロジェクトに総額1400億円が投じられた。これにより、廃熱利用技術システム、電磁流体発電、ガスタービンの改良、汎用スターリングエンジン、燃料電池技術の開発、ヒートポンプの

効率化などの我が国のエネルギー、産業技術として重要な成果を生んできたといえる。

1.2 高効率ガスタービン研究開発の概要

中でも「高効率ガスタービンの研究開発」は、我が国の発電端効率を画期的に向上させ、原油をはじめとする輸入エネルギーを節減するとともに、大きな省エネ効果を得ることを目的とした、技術実証を含むムーンライト最大の研究開発プロジェクトであった。

研究開発の技術課題とその目標、技術内容は表2に示す通りである。本表は、研究開発を当初の公的文書に記載のある目標に加え、研究途上で定義された目標及びプロジェクトが自ずと有する技術目的などを整理して筆者が作成したものである。目標の中でもタービン入口温度1500℃は技術を知るものこそ、その夢とも言える高いターゲットと捉えた。また、再熱（リヒート）サイクルガスタービンは大型ガスタービンとして最初の挑戦であった。

研究開発に参加した企業、機関は以下の通りであり、その総経費は、当初計画で260億円、実際には277億円となり、そのうち民間企業の経費として238億円、試験研究機関へは約39億円が投じられた。

プロジェクト参加企業・機関

高効率ガスタービン技術研究組合（民間）

重工・重電 三菱重工、川崎重工、IHI、日立、東芝、三井造船

電力 電中研、東電

材料メーカ 日立金属、三菱金属、神戸製鋼、大同特殊鋼、京セラ、日本硝子、旭硝子

試験研究機関 機械技研、名古屋工試、大阪工試、九州工試（以上現産総研）、航技研（現JAXA）、金材研（現物材研）

このほか、産技審省エネ部会や推進会議など委員会の

原稿受付 2016年9月26日

*1 SKYエアロスペース研究所

〒160-0023 新宿区西新宿7-21-1

Table 1 Moonlight project overview

プロジェクト名	内容と成果
1. 廃熱利用施術システム	1976～81年度： 熱回収ヒートポンプとして吸収式システム開発を行い、実用化に成果を上げた。
2. MHD発電	1976～83年度： 電磁流体による直接発電技術として灯油燃焼発電実験を中心に技術蓄積を行った。
3. 高効率ガスタービン	1978～87年度： 重電メーカー、重工メーカー、東電、研究所、大学が参加し、10万kwのパイロットプラントを開発する大型のプロジェクト。技術目標は当時世界最高の1400℃級タービン技術と再熱再生ガスタービンシステムを中核とする蒸気タービンとの複合サイクル技術によって、総合発電効率55%（LHV）を実現する技術確立をすること。1300℃のパイロットプラントにより、51.7%の複合効率を実現し、さらに高度技術を目指したプロトタイプ要素試験により、耐熱合金、セラミックス材料技術、燃焼器、タービンなどの先端要素技術開発にも多くの成果を残し、その後の我が国のガスタービン開発製造に多大なる影響を与えた。
4. 汎用スターリングエンジン	1982～87年度： 熱効率37%の中小型冷房機用スターリングエンジンの実用化技術の開発を実現し、実用化の目途を得た。
5. 新型電池電力貯蔵システム	1983～91年度： 4種の新型電池（Na-S、Zn-Br、Zn-Cl、レドックスフロー）の1kwおよび10kwの電池を開発し、70%から77%のエネルギー効率を達成し、また1000kw級の改良型鉛電池、Na-S電池、Zn-Br電池それぞれの実証システムを開発・運転試験を実施。
6. スーパーヒートポンプ・エネルギー集積システム	1984～92年度： 圧縮式ヒートポンプとケミカル蓄熱装置を組み合わせたシステムの技術開発を目的に、1000kw級のパイロットプラントの施策運転試験を実施。さらに大型の設計研究を行い、技術・経済性評価を実施。

「1999/2000資源エネルギー年鑑」を参考に作成

Table 2 R&D technical objectives and target for each subject

項目		開発目標
複合発電サイクル	コンバインドサイクル発電システム	中間冷却・再熱ガスタービン＋排熱回収蒸気タービン：HTDU、パイロットプラント実証、プロトタイプ設計による技術実証と材料開発、要素研究の総合。
	総合効率	55%以上（LHV基準）
	タービン入口温度	1500℃（Pilot Plant:1300℃, Prototype:1400℃）
	ガスタービン出力	100MWクラス（LNG燃料）
要素技術	圧縮機	高空力性能（高断熱効率）
	燃焼器	1500℃、55ata（5.5MPa）燃焼器、低冷却空気量
	タービン	1500℃に耐える十分な冷却性能、高効率
	制御システム	可変静翼制御、ダイナミックシミュレーション
	熱回収システム	蒸気サイクル（2段混圧）の適合設計研究
超耐熱合金	クリープ破断強さ	1,000℃、900℃、800℃クリープ破断強さ
	高温定歪疲れ強さ	0.5%全ひずみ幅2,500回以上
	高温耐硫化腐食性	高温溶解塩浸漬試験クリア
超耐熱セラミックス	曲げ強度	1,500℃ 3点曲げ強度実現
	高温腐食性	1,500℃、1,000時間大気暴露後の常温曲げ強度
	クリープ破断強さ	1,500℃、1,000時間のクリープ破断強さ

諸先生方、各電力会社の経営、技術陣の方々など、直接参加の300名を超える研究者技術者に加えた多くの方々の参加で進められた。

2. パイロットプラント、プロトタイプによる技術実証

計画の中核となる技術実証は、総合効率50%（LHV）、出力10万kw、タービン入り口温度1,300℃のパイロットプラントの開発、運転であり、実証プラントはそれまでに所有する技術を基盤に、航空エンジンの知見を大幅に取り入れ、重工・重電メーカーの分担により開発され、三菱重工高砂で組み立て、試運転の後、東京電力袖ヶ浦

発電所に設置された。図1はパイロットプラントの開発されたロータ部である。1986年から約1年間運転試験が行われ、総合熱効率51.7%、出力9.3万kwを達成し、多くの技術データを取得した。私も見学の機会を与えられ、巨大なLNG貯蔵タンクや大型蒸気発電設備の脇に、比較すれば小さく見えるパイロットプラントが真新しい光を放っている姿を覚えている。このプラントは、航空宇宙技術研究所（航技研）の先輩である故松本正勝教授のご尽力で日本工業大学付属博物館に保存、展示された。

挑戦的技術の事前検証とプロトタイプシステムの部分実証として、パイロットプラントの高圧部と同一寸法の高温高速タービン試験装置（HTDU）が開発され、燃



Fig. 1 Pilot plant at sodegaura site of TEC

焼器、高温タービン部の要素試験装置として用い、高度な空冷タービン翼、高温高負荷燃焼器、回転部のバランスとシール、熱管理技術などを試験、多くの先端的データを取得し1400℃の技術確立をもたらすとともに、総合効率55%の実現を実証するデータを輩出した。

これに続くプロトタイプ的设计研究は、要素研究成果とパイロットプラントの実証成果を受けて行われ、技術成果を総合化することでプロジェクト目標値である1400℃、55%が確実に実現できることを示した。これにより、計画着手当時に途方もない目標値として考えられていた1500℃レベルのリヒート（再熱）サイクルガスタービン技術が、現実に我が国のものとなったのである。その後の目覚ましいコンバインドサイクル発電システムの発展は、このプロジェクトなくしては実現しなかったと言っても過言ではない。

3. 航空宇宙技術研究所のムーンライト研究開発—ちょっとした異文化交流と挑戦的研究

現宇宙航空研究開発機構（当時の航空宇宙技術研究所：これ以降便宜上本稿では航技研と記す）では、1971年からほぼ10年間研究開発を続けてきたファンジェットFJR710の研究開発が終盤に差し掛かり、研究がSTOL実験機の開発へと移行する時期に当たっていた1977年、1250℃を実現した高温技術を地上用ガスタービンへ展開するべく、ムーンライトプロジェクトに参画した。技術の中心はタービン冷却と高温高圧燃焼器技術であったが、タービン空力設計、可変静翼付き圧縮機技術、エンジン制御シミュレーション技術、セラミックコーティング技術、さらには計画後半に採用された蒸気冷却技術などにも要素研究として参加し、特にプロトタイプ設計研究にデータを供給していた。

当時の航技研原動機部とその兄弟部とも言える航空機公害グループは、新しい技術展開分野である発電用ガスタービンの研究に対し、新たな技術挑戦の場として高い意義を感じ、さらには、重電メーカや重工ガスタービン部門、電力関係者などとの交流に新鮮味をおぼえていた。この私自身も、その研究開発への参加に加え、スタンフォード大学での在外研究員生活の余韻の冷めない1982年8月から約1年間、当時の通産省工技院にムーンライト推進室専門職として派遣され、プロジェクトのお世話をする経験に恵まれた。当時のことは大変良く覚えているが、その積もるよもやま話は、紙面が許せば後に記すことにしたい。

3.1 タービン技術の研究

1960年代後半から急勾配で進み始めた。高バイパス比ターボファンエンジンの実用化は、ファン動力を得るた

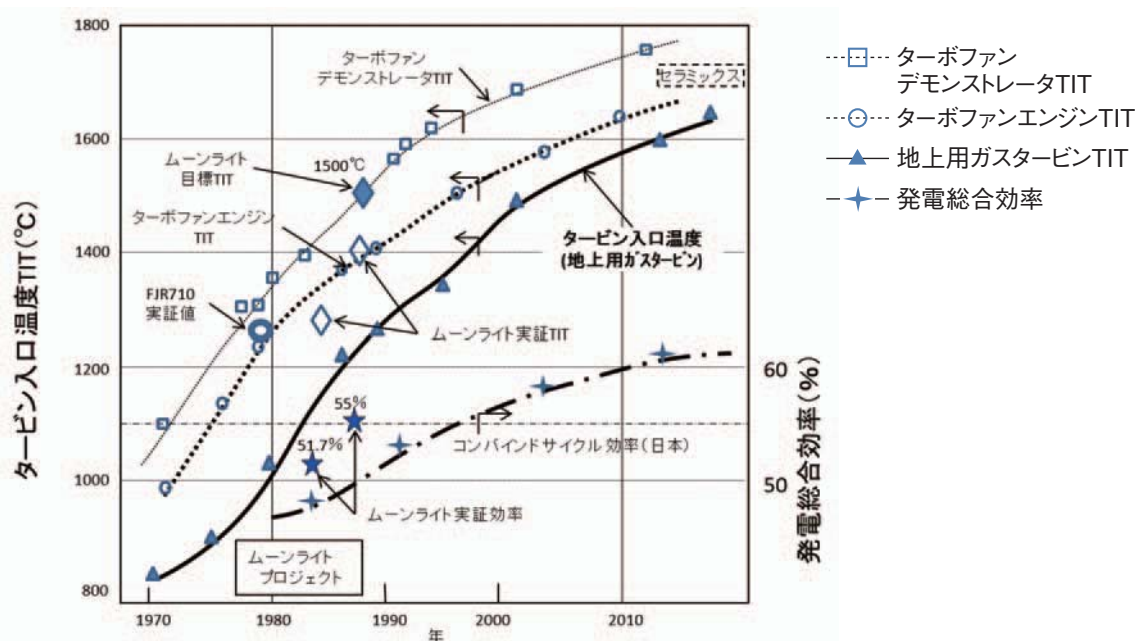


Fig. 2 Turbine temperature increase of aero-engines and electric generation gas turbines and their efficiency improvement

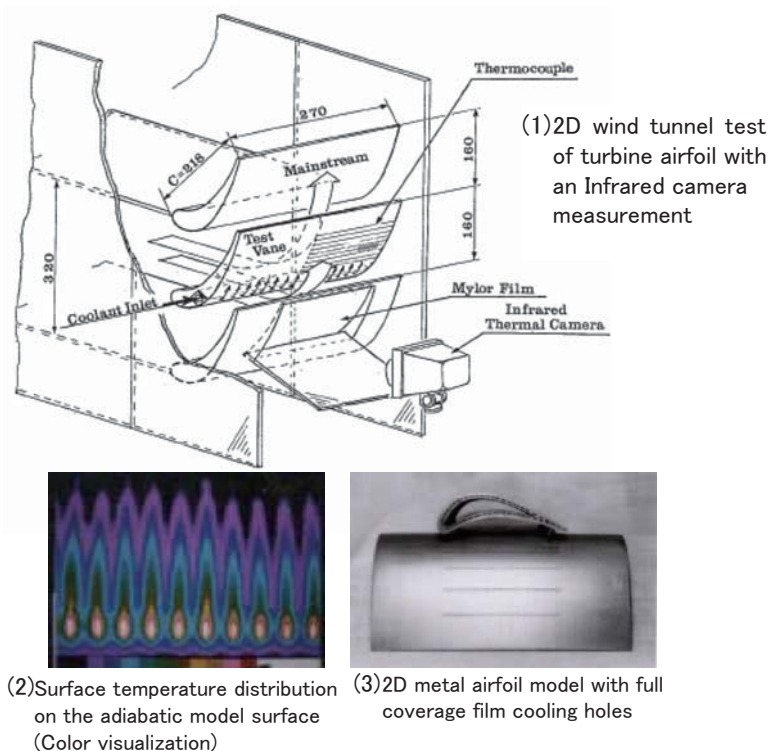


Fig. 3 Basic WT tests for turbine airfoil cooling technology (Full-coverage film cooling)

めに、コアエンジンの高温化、高圧化が第一の要求であり、高度な製造技術を伴う冷却技術と超耐熱合金がキーテクノロジーであり、さらに進むと、結晶制御鍛造法やセラミックコーティング技術が、重要技術として開発に拍車がかかった。図2は1970年からの航空エンジンと発電用ガスタービンのタービン入口温度の高温化と、ガスタービンを主機とするコンバインド発電システムの総合効率の変遷である。図中には、1300℃、1400℃および1500℃のムーンライト計画目標値と、総合効率の実証値を記入したが、本研究開発目標と成果が、我が国のガスタービン高温化と発電効率向上に向けて十数年先行し、その後の実用化を先導していたことが理解できる。また、それらに先行するFJR710が、その目標値1250℃を数年前に実現していたことも示した。

航技研ではタービン翼のフィルム冷却技術を中心に研究を進め、計画半ばでは図3に示すような、低圧翼列試験で断熱壁面温度を2次元サーモグラフィーで計測し、当時の画像メモリーとミニコンを使ってカラー画像化するなどの、計測・画像処理技術にも研究をのぼした。図中の(3)に示す内部インピンジ冷却と多列フィルム冷却を組み合わせた金属翼模型により、冷却効率0.65の高い成果を得た。また、55気圧(5.5MPa)の高温高圧条件下を模擬した伝熱試験も行い、ヌッセルト数やビオ数あるいは Stanton 数などの指標に対応する冷却翼の実用的設計データの取得にも大いに取り組んだ。当時のターボファンでは、現今の様な圧力比50やタービン入口温度1600℃などは未だ出でおらず、ムーンライトの目標値は航技研として未経験であり、却って将来のジェットエン

ジン研究に好環境をもたらしていた。事実、ムーンライト計画終了後に始まった超音速機用エンジンHYPR計画で、この研究成果がタービン及び燃焼機開発の有用な技術基盤となった。さらに、プロジェクト後半により高い冷却性能を求める課題が提起され、蒸気冷却が新たに提案されたことを受け、航技研に設置された高圧燃焼試験設備を用いた、金属円筒模型による伝熱試験にも取り組み、水蒸気の高い冷却能力のデータを取得した。

3.2 燃焼器技術の研究

燃焼器は、高圧、再熱どちらもキャニュラーと呼ぶ、円環型の外筒に缶型の内筒を組み合わせた燃焼器であり、何れも燃焼温度あるいは入口空気温度の高い、きわめて挑戦的なものであった。特に高い総合効率を実現するために課せられたガスタービン効率の向上に向けて、出口温度分布の均一化や冷却性能向上、燃焼器短縮化、また、低NO_x化などの研究は大いに刺激的であった。



Fig. 4 Models of high-pressure combustor (left) and medium pressure reheat combustor tested in NAL (Not scale)

図4は航技研で行った単缶試験用の供試燃焼器である。缶型であり航空用のアニユラ型とは異なるが、燃焼器技術の基本的な考え方は航空用と同様、微粒化燃料噴射弁（気体燃料のため微粒化には当たらないが便宜上そう呼ぶ）、適切なリサーキュレーションの付与、燃焼筒冷却、TBC、燃焼ガス希釈、冷却、混合のための2次空気などの技術の採用である。この燃焼試験のために、航技研に新たなメタン燃料を扱える高圧燃焼器試験設備を整備した。これに伴い当時の原動機7号館が気体燃料の防爆仕様で作られ、その後の研究にも大変役に立っている。特にHYPR計画では、気体メタン燃料を使用することに加え、高温燃焼、低NO_x燃焼、ラム燃焼器技術などの研究に活用した。

3.3 その他の研究

上記のほか航技研では、システム制御の研究、可変静翼圧縮機の研究、高温部材へのセラミックス適用の研究、ティップクリアランス制御と計測の研究などを実施した。航技研は航空エンジン技術を地上用ガスタービンに応用することが役割であったが、プロジェクト全体を通じて、今は亡き松木、鳥崎両部長が指導的役割を果たしておられ、また、私を含めて10人の研究者が工技院専門職として派遣され、プロジェクトマネジメントの一端を担って来たことなど、多くの他機関、民間企業の研究開発活動に触れる機会が多かった。このため、セラミック素材の適用、蒸気冷却技術など、航空エンジンに直接関わらない技術課題についても積極的にテーマに取り上げてきた。

4. その他の活動

筆者は、前述のように工技院の専門職としてムーンライト計画の管理運営の一端に関与した。このお陰で、東芝や日立、三井造船や、セラミック企業など、またそれらの企業で構成された、高効率ガスタービン技術研究組合の方々など、航空としては付き合いの少ない企業の技術者と交流出来たこと、また同時にムーンライト室が担当する省エネルギー課題の業務にも携わったことなど、特別な経験であり、よい思い出にもなっている。特に1983年3月にガスタービンを含む、ヒートポンプ、エアコン、電池電力貯蔵、廃熱利用などの省エネルギー技術に関する日仏会議（「日仏省エネルギー技術に関する専門家会議」）に訪問団総括としてフランスに出張したことは、貴重な経験であった。派遣団は、坂倉ムーンライト室長を団長に、ガスタービンから日立の樗木さん、川重の大槻さんが参加され、当時の化学技術研究所や資源エネルギー庁、三井造船、湯浅電池など錚々たる技術陣22名で構成された。パリ市内で行われた2.5日間の会議と、自動車のルノー社、ガスタービンとTGVのアルストム社、モービル石油の製油所と言った工場見学を行った。このフランスとの交流は、その後の我が国省エネルギー技術研究に少なからず影響を与えていると思われる。

私自身にも、フランスの技術と産業の一端を知り、また、いまだに交流している内外の知人を得たことなど、大変よい思い出であり、体験であった。

このほか、大蔵省との予算協議、次期プロジェクトのための種まき活動、多くの学術、技術あるいは政策講演会、開発途上に起きた大小のトラブル対応、さらには、先端技術の共有と方向性の議論のために関係者に声をかけて始めた技術連携会議など、枚挙にいとまがない。

5. おわりに

このプロジェクトは、今の多くの関係者が語るように、日本の地上用ガスタービン技術を、世界トップのレベル技術へと挑戦を強い、産業界・技術界の一致した目標意識がチームワークをもたらし、内外からの省エネ技術への強い期待が実用化への流れを早めるなど、その後の実機開発を大きく加速することになった。また私の眼には、産業人が世界に先駆けた未来を掴もうとして垣根を超えて必死に頑張る姿、研究所・大学が世界に誇るべき技術の実用化を民間と一緒に挑戦する姿など、実にダイナミックであり、強く感銘した場面が今もはっきりと思い出される。

現在では、図2に示したように、遥かに高い高温条件を手にし、既に航空用ガスタービン技術を凌駕するレベルにまで達している。国際ビジネスでは、技術の高さがそのまま市場占有率に反映する訳ではない。国際ビジネス基盤、人材、国家政策など、技術以外にも課題が見出せる。これは、私が現在関与する航空機産業においても指摘できる重要な産業と政策の課題である。産業規模や、世界市場占有率の拡大は、技術とシステム価値の国際化を意味し、技術の標準化や基準にも大きな意味を持つことになる。現在からさらに発展させるためには多様な戦略が必要であろう。絶えざる研究開発と、競争と連携を往復するような、多角的な戦略の策定と実施など、今後に大いに期待したい。

なお、本稿の執筆に当たり、多くの方々のご協力を得た。紙面を借りて感謝の意を表したい。

参考文献

- (1) 資源エネルギー庁（監修）、1999/2000資源エネルギー年鑑、（1999）、p. 652、通産資料調査会。
- (2) 高効率ガスタービン技術研究組合、ムーンライト計画 高効率ガスタービン研究開発10年の歩み、（1997）、pp. 39-111、高効率ガスタービン技術研究組合。
- (3) 松木正勝、鳥崎忠雄、Development of Reheat Gas Turbine for Pilot Plant、（1987）、IGTC1987。
- (4) 電力中央研究所、ガスタービン開発における国プロの役割、（2008）、pp. 07-009、電中研報告Y07009。
- (5) 専門家会議代表団（坂田公夫）、省エネルギー技術に関する専門家会議報告書、（1983）、pp. 9-15、工業技術院ムーンライト室。

特集：大型プロジェクトに学ぶ：航空機エンジン及び発電タービン技術・産業の将来への提言

産業界から見たムーンライト計画の歴史的意義と反省

A Review on the 'Moonlight Project' by a Gas Turbine Manufacturer



福江 一郎^{*1}
FUKUE Ichiro

キーワード：ガスタービン，ジェットエンジン，原動機，コンバインドサイクル
Gas Turbine, Jet Engine, Prime Mover, Combined Cycle

1. はじめに

30年前，多くの人たちが情熱をかけて挑んだ「ムーンライト計画」は，産業界にとってほろ苦い思い出となっている。産学官，関係するすべての機関・企業が参加した国家プロジェクトであり，また当然のことながら産業界は構成員としての役割を果たしながら，ムーンライトには間接的にしか関与していない傍観者的な感覚を持ってしまう。自分たちのビジネスとは別次元で進化したとの印象である。当時，必死に実用化を目指したレヒートサイクルは本当に正解であったのか？ あれだけの費用と労力をつぎ込む価値は本当にあったのか？ 現時点で振り返るといろいろな疑問が沸き上がってくる。

一方で，ムーンライトは日本の高温ガスタービン技術の生みの親であるのも厳然たる事実である。ムーンライトへの参画により日本のガスタービンメーカは鍛えられ成長した。この面では大いに感謝すべきである。またガスタービン技術が未成熟な時代において，時代を先取りした野心的な目標を掲げ，果敢に挑んだ先人たちの新進気鋭の精神は大切に伝承すべきと思う。ただし，プロジェクトの進め方については，やや唯我独尊的過ぎたきらいがあり，もう少し，各方面からの情報入手に努めるべきでなかったかと悔やまれる。組合方式の是非も含めて，プロジェクトとしてプラス面（陽）とマイナス面（陰）を持つのも事実である。

2. 壮大な夢に挑んだムーンライト（カルノーへの挑戦）

ムーンライトの出発点は第一次オイルショック真っただ中の1974年，工業技術院の「大プロ室」の研究テーマとして取り上げられたことに始まる。当時，国の省エネ政策の一環として，LNGを燃料とするガスタービンを

ンバインド発電の高効率化と国内メーカの育成は喫緊の重要課題であった。この時点で，「効率50% HHV（＝55% LHV以下LHVで統一）@1500℃を国産技術で達成*」という先進的で且つ挑戦的な目標を定めた。これらの目標は，当時の技術レベルから考えて，想像を遥かに超える夢の様な目標に思えた。（*当時55%を超えることが「カルノーサイクルの限界」と考え目標が定められた。）

この「55%達成」と言う重い命題の下，ムーンライト計画は，計算上，最も高い効率が期待されたレヒートサイクルの開発に挑むことになる。その後，10年に及ぶ開発で1300℃のパイロットプラントは完成するが，プロジェクト期間中に55%の達成，およびレヒートサイクル商業化には，結局成功しなかった。しかし，長期的な視点で歴史を振り返ると，ムーンライト終了後10年で，ムーンライト参画で力をつけた国内メーカが，シンプルサイクルで所期の目標（55%@1500℃）を達成し，結果的にプロジェクトとしてのけじめをつけることになる。

また，図1に示すとおり産業用ガスタービンの歴史を50年というスパンで俯瞰してみると，第二次世界大戦後，しばらく続いた自主技術の時代から，ライセンス技術の

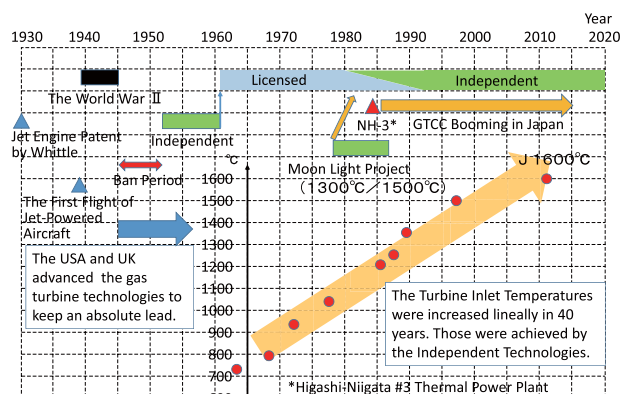


Fig. 1 Fifty years history of industrial gas turbine (MHI)

原稿受付 2016年9月5日

*1 三菱重工業(株) 特別顧問

〒676-8686 高砂市荒井町新浜 2-1-1

時代に移行し、その時代が暫く続くと思われた1970年代に登場したのが、高温ガスタービン技術の国産化を目指した、「ムーンライト計画」であった。絶妙のタイミングでムーンライトが出現し、自主技術確立を後押しした。これをきっかけに日本は先行する欧米勢を急迫することになる。現在ではタービン入口温度1600℃＋、コンバインド効率63%付近まで性能改善が進み、日本メーカは海外勢と厳しい競争を繰り広げている。絶対的なシェアはともかく、技術面では海外勢に対して一歩も引けを取っていないし、そればかりか、ある部分ではリードするレベルまで達している。ムーンライトを源流とした技術の核が大きな流れに発展し、最初の「志」は十分に成就されたと言える。

3. 研究組合の設立とその評価

「ムーンライト計画高効率ガスタービン研究開発」(1978年～1987年)は、日本の産業用ガスタービンの歴史の中でも、画期的で空前絶後の大国家プロジェクトであった。当時の工業技術院をヘッドに国立の研究機関(6研究所)、電力会社(10電力)、関連するメーカ(材料メーカ7社、ガスタービンメーカ6社、電力中央研究所)など、およそガスタービンに関係するすべての機関、企業が参加した。総予算は260億円にのぼり、正に国家総動員的な産学官連携プロジェクトであった。

1978年に、必要な要素技術開発とパイロットプラント建設のため「高効率ガスタービン技術研究組合」が結成された。研究組合には国、電力会社、および各メーカより資金と要員を出し合い、協力して日の丸ガスタービンを開発する体制を構築した。一見、盤石に見える体制であったが、研究組合解散後の追跡調査では、半導体などの成功事例とは対照的に、ムーンライトの場合は、どちらかと言うと失敗事例として語られる場合が多い。色々な人たちが集まった複合組織であるが故の意見集約の難しさに加えて、権威主義、縄張り意識、柔軟性に欠ける運営、多数意見による妥協の積み重ね等々、産学官連携プロジェクトの本質的な欠点が出てしまう。これらの欠点は「高効率ガスタービンの開発」というピンポイントを狙った独創的な直観力が要求される開発プロジェクトの特性にはそぐわないものであった…。最近、ゲノム研究の権威である和田先生も同じようなことを書かれている。

また、研究組合が結成された段階で、プロジェクトの主導権が官学に移り、それまで国産技術の育成という大義で積極的に関ってきた電力会社のスタンスに微妙な変化が出てきたような気がする。電力会社はプロジェクトを通じて参画はしていたが、ユーザとしての意見が研究組合内で通り難くなり、次第にムーンライトに対する興味を失ってゆく。後の歴史が証明するように、実際は日本の電力会社は日本国内だけでなく、世界のガスタービン技術の開発に主導的な役割を發揮することになるが、

「研究組合」は一番重要な支援者の理解を十分に得ないまま独自の道を突き進んだ。

4. ムーンライトと並行して進んだ民間プロジェクト

当時、産業界がムーンライト一色に染まったわけではなく、ムーンライトに参画している各メーカは、一方でムーンライト研究組合での役割分担をこなしながら、他方で実業である電力会社向けコンバインドサイクルの計画、建設を済々と進めていた。時系列に整理すると、ムーンライト計画が本格的にスタートする1978年の時点で、有力電力会社(複数)はシンプルサイクルで1100℃クラスのコンバインドサイクルの基本計画を始めている。日本の電力会社の通例として、一つは海外からの輸入品(東京電力・富津/GE)をベースに計画され、あと一つは対抗のため純国産(東北電力・東新潟/三菱重工業)で計画された。これらは6年後の1984年にムーンライトの完成より先んじて、成功裏に営業運転を開始することになる。いずれもそのあと完成するパイロットプラントの効率に迫る48%～49%の効率を達成する。またこの時期に、その後、世界のデファクトとなるドライ式低NO_x燃焼器の開発の要請が電力会社から出され、(消費する水の節減と損失回避の面から)これに三菱が独自に開発を続けた結果、世界で初めて実用化に成功する。ムーンライトはこのような市場の動きを全く配慮せず、水を大量に使う設計(湿式中間冷却)を維持したまま進む。1100℃級のコンバインドサイクルが完成した1984年の時点で、電力会社はすぐに次世代の1300℃クラスガスタービンの開発要請を国内外のメーカに出し、5年後にいわゆるFクラスのガスタービンを三菱、GEで同時に完成する。このように電力会社の主導で進んだ民間路線であったが、その後の研究開発により、驚異的なスピードで性能改善が進み、シンプルサイクルでもムーンライトの目標値55%を悠々超えて発展を続けてゆく。

5. 純国産技術の幻想と限界

ムーンライトのもう一つの目的であった、国内の機関、メーカを結集して「日の丸ガスタービンを作る」という構想はどうであったか。三菱重工業、東芝、日立製作所、IHI、川崎重工業、三井造船、ムーンライトで協力した国内ガスタービンメーカもプロジェクト解散後は、つい最近までお互いに協調するムードはなく、それぞれ海外メーカ(ライセンサー)との協調、または独自路線を選択しバラバラな道を進んだ。(レヒートサイクルが大成功を収めれば大連合の可能性もあったが。)三菱の場合、1300℃のFシリーズ以降、開発のパートナーに選んだのは、ライセンサーであった米国のWestinghouse社(WH社)であり、その後も海外メーカ(航空エンジンメーカも含む)との共同開発が続く。また冷却・空力等の要素技術開発のパートナーにはMIT、ケンブリッジなど海外の有力大学を選択することとなる。ただし、唯一、予混

合燃焼は社内独自開発の道を選んだ。このようにパートナーは海外から選んだが、その間、棟梁的な立場で開発のリーダーシップはとり続けたことから、定義上は国産技術の旗印を貫き通したことになる。

純国産技術、日の丸飛行隊、陥りがちな罠であるが、実際のビジネスは国際協調の下で進んでいるので、日本チームだけで纏めようとするところに無理があるのではない。競争原理から考えて、無理やり純国産にこだわるより、海外の知恵をうまく取り入れた製品や、海外勢も含めて複数の供給元が存在する方が、ユーザにとって都合がよいはず。この点、関係者の間で未だに誤解が存在し、日本の停滞の一因になっているような気がする。官主導より、民主導、国粋主義よりグローバル協調が自然であり、かつ強力アライアンスになる可能性が高い。最近、国家プロジェクトといえども海外企業に参加資格を与えるケースが出てきているが、当時は思いもよらないことであった。

6. なぜレヒートか？（賛否両論、評価が分かれる）

研究組合の組織上の欠陥がもろに出たのが、最初に高い目標効率を達成するのに、複雑で商業化が困難な「中間冷却、再燃サイクル」を選んだことではないか（言い方は悪いが、学研的であり、実用的ではない）。戦後間もなく流行ったサイクルのリバイバル、昔の技術者のノスタルジアと言う言い方もできる。55%の効率達成がプロジェクトの至上命令であったため、計算上で効率達成が可能と思われた、複雑なレヒートサイクルに突き進むことになる。確かに計算上はそうかも知れないが、実用化の難しさ、商品性に対する考慮は軽んじられた。また同時に肝心のユーザ（電力会社）がどう思うかについても無頓着であった。

1978年10月に各メーカから要員を出し合って「設計室」が結成されたが、設計室の最初の仕事は、基本的なヒートバランスを作ることであった。（この時点でレヒートサイクルが決まっていた訳ではなかった）図2に当時の計算結果を示すが、シンプルサイクルとレヒートサイクルを同じ条件で比較計算すると、レヒートの方が2ポイント以上、効率が高くて。また、さらに要素効率の改善を最大限見込んで、レヒート／1500℃でやっと55%に届くという計算結果である。この計算をベースに、研究組合は55%達成のためには、レヒートサイクル採用が絶対条件であると宣伝したが、実際は、その後、民間プロジェクトで開発が進んだシンプルサイクルでのコンバインド効率は、1450℃～1500℃で55%をこえることが証明される（当時の計算との差は、その後の要素効率の驚異的な改善であるが、当時は、このような要素効率は想定できなかった）。また、レヒートの計算上のアドバンテージは、すべてが理想的に実現できた場合のみ有効であり、実機ではコンポーネントの数が増えるに従い、予期せぬ漏れ空気、圧力損失等で効率のアドバン

テージを簡単に食いつぶしてしまう。この点は設計室も、ある程度わかっており、設計室からはレヒートとシンプルサイクルの両案を上程したが、研究組合の理事会／運営委員会では、理論的に効率が高い方に支持が集まり、結局はレヒートサイクルが選択されてしまう（理論的な数値へのこだわり、多数の無難な意見の採択という研究組合の組織上の特性が出ており、意外と本質的な観点が抜ける場合がある。例えば、レヒートサイクル開発の稟議書が民間会社の経営会議に上程された場合、その会社の会長の「ところでこれは電力会社を買ってくれるのか」という素朴な質問で多分没となる。開発で一番重要な点は、技術力の誇示ではなく、単に売れるか否かの判断である。（当然のことであるが））。

複雑なレヒートが選ばれた一番の理由が「シンプルであれば民間でもやれるが国家プロジェクトでは民間がやれないことをやるべき。」（これは主として資金を出す財務筋からの意見らしいが）ということであった。これがこのプロジェクトの性質を一番良く言い表している。またレヒートを選んだもうひとつの理由として、コンポーネントの数が多く参加企業に役割を分担しやすかったと言う説明があるが、冗談のようで本音の理由であろう。

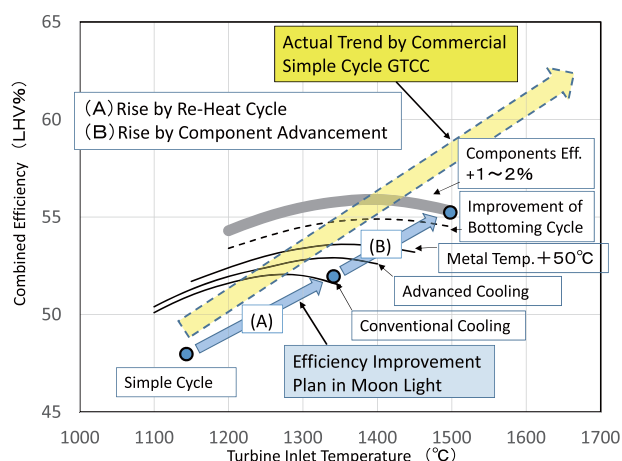


Fig. 2 Efficiency improvement plan in moon light project

7. メーカの訓練場としてのムーンライト

結論的に言うと、ムーンライト計画は当時の産業用ガスタービンの高温技術レベルを底上げするのに大いに役に立った。このサイクルでは高温化、高圧化、耐熱材料、精密鑄造、再燃、2軸制御、蒸発式の間接冷却などガスタービンに必要なあらゆる要素技術が試されるということで、参加メーカにとっては、絶好の練習台となった。歴史を振り返って、もしムーンライトがなければ、国産技術が高温ガスタービンでここまで世界をリードするまでならなかった可能性もある。（歴史上のifの検証は難しいが）。

ムーンライトが始まった1978年当時、産業用ガスタービンは1100℃のレベルであり、しかもほとんどが外国からのライセンス技術に頼っていた。（一部メーカは除く

が) 今振り返ると、本当に恥ずかしいような稚拙な技術レベルであった。そこに降って湧いたのが1300℃、さらに1500℃クラスの高スタービンの自主開発である。当時の印象としては到底できると思わない、まさに夢物語的なプロジェクトと映った。実際に研究組合を作って、設計室に各社から要員を出して基本計画を始めたが、特に冷却翼はどのように設計するのか、またどのような冷却構造にするのか、最初は全くのところ手探り状態であった。当時の最新の航空エンジンである、JT9D、CF6の情報を入手して、まずはコピー的な逆解析から始まった。航空エンジンの経験があるIHI、また三菱の航空エンジン部門からの情報は大きい役にたった。またジェットエンジンの補修翼の切断調査も行った。おおまかな冷却構造のイメージはこの様にして把握し、具体的な冷却設計は、各社で実施した伝熱試験のデータを使用した。冷却翼の最終チェックはHTDU（高温高速タービン試験装置）で行ったが、ここで得られたデータは計算の整合性のチェックに大いに役に立った。ムーンライト計画の目的を「高温技術の確立」だけに限れば、実機の製作・運転を省いてHTDUの試験だけで十分であったかも知れない。高スタービンの基本計画は各社から選出された精鋭の設計者で構成される「設計室」（総勢47名程度）で行った。設計室長のもと、要素ごとにリーダーがいて、取りまとめを行った。強度に関しては組合としての統一設計クライテリアを作成したが、個別の要素毎の詳細設計クライテリア等は各社の社内基準を使って行われることが多かった。実業ではライバル同士の混成部隊であるが、表面上は和気あいあいの雰囲気の中で設計がとりまとめられた。ただし、腹を割って機密ノウハウを持ち寄るレベルまでは達しなかった。これは組合方式の限界であったと思う。航空機エンジン開発と同様に部品毎の縦割り責任分担方式（リスク&レベニューシェア）をとればもっとすっきりしたかも知れないが、当時の各社の実力から考えて現実的ではなかった。このように設計室は各社が高温高スタービンを学ぶ絶好の訓練場となったが、当然、設計以外にも、精密鍛造翼の試作、翼/ディスク加工、組み立て、試運転など、高スタービンの開発プロセスを一気通貫で経験できるという点で、まさに総合訓練所であった。

8. HPCの失敗と要素開発

ムーンライトの目的が高温技術の習得に集中していたため、その他のコンポーネントであるHPC（高圧圧縮機）、LPC（低圧圧縮機）等は従来技術適用との方針が決められていた。LPCは三井造船の高炉送風機の設計、HPCは三菱の社内データにより設計された。LPCは従来技術の延長で問題なかったが、HPCは空力的にはあまり無理をしない方針ながら、吐出圧力55気圧という、従来機の4倍の空気密度に耐える設計である点に落とし穴があった。翼列の設計において強度を確保するために弦

長を伸ばす結果が最初に得られたが、出来上がったフローパスが手本にした航空エンジンに比べて随分細長いものとなってしまったため、断面図上バランスが悪いとの指摘を受けて、無理やり設計クォリタリギリギリまで軸長を短縮してしまった。これが幾度となくトラブルを起こす元凶となった（多量の抽気による励振、静翼枚数差による励振、翼根の応力集中も付随的原因であったが、根本的な原因は体格不足であった）。最終的に採用した根本対策はオリジナル設計の軸長に戻すことであった。設計時にだれも注目していなかった個所が一番トラブルを多発し、プロジェクトの足を引っ張ることになる。

高圧燃焼器、再燃器はNAL（航空宇宙技術研究所）と川重の共同作業で拡散式燃焼器が開発され、中間冷却器に噴射された水蒸気雰囲気下での燃焼、また低酸素濃度における再燃器での燃焼など大きな問題なしに試運転を終えている。せっかく開発された立派な燃焼器であったが、このころすでに世界はドライ式低NO_x燃焼器（予混合燃焼方式）が主流となりつつあり、ムーンライトの技術の波及効果は限定的であった（ここで研究された積層冷却はその後各社に普及する）。

ムーンライトでは耐熱材料開発、セラミックス材料開発も国の研究機関が分担して実施された。耐熱材料に関しては、ムーンライト終了後も最適なDS材、SC材を目指して研究開発が続いているが、パイロットプラントに関しては、データが揃っている市販材が使われた。セラミックスに関しては、当時はまだ実用レベルに達しなかったが、30年を経た現在、CMC等見直される時期に来ている。また、シェル&スパー、ラミネートなど先進的な冷却構造も基本的な実験が行われたが、当時の先進的な研究も、殆どがまだ実用化に至っていないのが現状である。

9. ムーンライトの波及効果とその末路

各社はほぼ同じ状況と思うが、ムーンライトの設計室での経験、および高温高速実証タービンであるHTDUのデータを使うと、1300℃級のシンプルサイクル高スタービンの設計は比較的簡単にできた（これはムーンライトの絶大な波及効果である）。三菱を例にとるとHTDUの製作と試験場を提供した経験、およびHPCの設計の経験を生かして、ムーンライトが終了するより前の1986年に12MW級の1250℃クラス小型高スタービンを訳もなく完成することができた。これは大型機の1/3スケールモデルを想定したものであり、この小型機の経験を生かして、電力会社が次期コンバインドの主機として想定していた1300℃級のFシリーズの開発を、提携先であるWH社をパートナーとして推進した。これがその後続く1500℃級のG、Hシリーズに発展し、ムーンライトの所期の目標である国産技術で1500℃級高スタービンを開発という目論見が間接的、かつ時間遅れを伴って実現することになる。

ただし、ムーンライトで高温技術の入門編は学んだが、これは粗削りの概念設計的なものであり、1プロジェクト／1サイクルの開発の経験だけで身に着くほど高温技術は生易しいものではないことを、その後思い知らされる。真の技術は、その後20年以上の年月と莫大なコストをかけて、フィールドでの貴重な経験（トラブル）をベースに徐々に蓄積され玉成されてゆくのである（この点は航空エンジンも含めて、世界でも少数の精鋭メーカしか理解していないと思う）。

ムーンライト計画そのものはHPCを中心とする数々のトラブルを乗り越え、1987年に1300℃級のパイロットプラントの試運転（図3）を完遂するが、その後、これを採用したいという電力会社はついに現れなかった。それに伴って、パイロット機に引き続き開発予定であったプロト機（1500℃級）の開発は計画段階で中断される。なぜ商業化に至らなかったかについては、試運転時のトラブルの多さ、運用面での煩雑さも理由となっているが、これに加えて決定的であったのは、ムーンライトプロジェクトが終了する頃には1300℃+のタービン入口温度で55%に迫る効率を達成するFシリーズが商業化されるようになり、レヒートの効率面でのメリットがなくなってしまったことにある。ムーンライトが始まった当時は世界最先端の効率を誇ったが、プロジェクト終了時点で、ごく普通の効率になってしまったという現実がある。考えてみれば、10年という年月は、動きが早いガスタービンの世界では長すぎるプロジェクトであった。時代の流れはドライ燃焼、シンプルへとムーンライトの当初の目論見と違った方向に急速に動いていった。時々刻々変化する市場の動きを国家プロジェクトとして捉えきれなかった。



Fig. 3 The pilot plant under trial operation (Sodegaura thermal power plant of Tokyo Electric Power Company)

10. ムーンライトを契機に飛躍した三菱重工業

ムーンライト計画をメーカの立場でとりまとめ、かつ同時期、東北電力の東新潟を完成させた三菱の立場、社内の状況はどうであったか？ 当時、少ない設計の陣容

を分断され大変であったのは事実である。ムーンライトはどちらかと言うと社内的には少数派であり、これに従事した人たちは随分苦勞した。ただし、会社として立派であったのは、HPCの相次ぐ事故で窮地に陥った時に、プロジェクトを見捨てることなしに、むしろ社を挙げて支援する体制を築いたことにある。どのようなプロジェクトであっても数々の困難とトラブルを克服して最後は完成する精神。これはホイットルの時代からガスタービン開発の真髓であるが、ムーンライトを最後まで完遂した経験が、のちにガスタービン事業を世界に伍していける事業に育て上げた原動力になっている。高温技術の習得という目に見える成果以外に、ガスタービンの開発とは如何なるものかということ、棟梁的な立場で身をもって習得したのは非常に貴重であったと思う（人的金銭的負担に代えがたい貴重な体験であった）。このように考えると、ムーンライトでの経験を上手く活用して国産技術を築き上げた三菱が一番の受益者である。三菱はムーンライト以降、吹っ切れたように自主開発路線を突っ走る。一旦走り出してしまえば、あとは日本人固有の器用さで開発スピードでは負けなかった。

11. 電力会社の役割と効率改善の経緯

日本の高温ガスタービン技術の「生みの親」をムーンライトとすれば、「育ての親」は文句なしに日本の電力会社（複数）である。日本の電力会社が国内外の高温ガスタービンの技術発展に果たした役割は大きい。この指導力は国内メーカのみならず海外メーカに及んでいる点に注目すべきである。世界でも先進的思想を持つ日本の電力会社が次々と狙うべき目標設定を行い、世界のガスタービンコンバインド市場の動向を牽引していくのである。図4に国内コンバインドサイクルの建設と効率改善の過程を示す。

ガスタービンの開発は温度レベルにより、F（1300℃）→G（1500℃）→H（1500℃）→J（1600℃）と進むが、それぞれの節目で次に狙うべき性能要目を国内外のメーカに示し、開発を競わせた。メーカにとって一番有り難かったのは、新開発の初号機を国内メーカから進んで購入してくれた点である（ガスタービンの開発は初号機の売れ先が決まっただけで80%完了した気分になる）。古くは戦後復興期から、日本の電力会社は設備導入に際して、新技術開発をメーカと一緒に共同開発的に行うことが慣例となっており、ユーザの立場でありながら技術開発に深く関わってきた。水力発電、超臨界のボイラ、タービン、原子力に続き、ガスタービンの開発にも同様の手法が引き継がれた。これは米国等の海外の電力会社には見られない慣習であり、日本独特の土壌の中で日本のガスタービン技術は育まれていく。ムーンライトとの違いは、歴史的に「もし電力会社のこのような支援がなければ、現在の日本のガスタービン技術発展の姿はない」と断言できる点である（この場合のifの答えは明

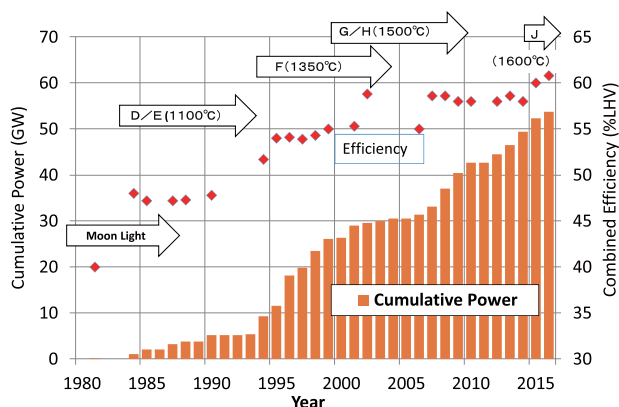


Fig. 4 The history of GTCC power plant in Japan

快である。同じ結論が米国政府の日本のガスタービン産業に関する調査報告書にも書かれている。

もちろんのこと、日本の電力会社のリーダーシップ以外にも、海外メカとのし烈な効率競争の影響は大きい。最初は50%を超えるのがせいぜいと思われていたコンバインド効率も、55%, 58%, 60%と他社との競争の過程で目標が次々と引き上げられ、不思議とそれに対応する技術が開発され、それぞれ大台を突破していく。タービン入口温度上昇は効率改善の重要な要素であるが、それにもまして、圧縮機、タービンの要素効率、冷却空気量(冷却効率、高性能TBC、漏れ空気)、ボトムング効率等の要素効率の改善が驚異的なスピードで進んでいくのである。

また発電用ガスタービンの開発で特記すべき事項は、開発努力(資金)の内かなりの部分が「予混合燃焼器」の開発に充てられたという事実である。30年前に東新潟において世界で最初に実用化に成功した「予混合燃焼器」であったが、まさに「パンドラの箱」の表現がぴったり当てはまり、箱を開けてしまったおかげで低NO_x化と燃焼振動との戦いは永遠に続いて行く。

12. カルノーへの挑戦と今後のテーマ

考えてみれば、200年前の若き天才カルノーは偉かった。1824年に出版された「火の動力についての考察」の論文で、当時まだ出現していない、内燃機関の高効率を予言し、またトッピングにガスサイクル、ボトムングに蒸気サイクルを組み合わせたコンバインドサイクルの出現でさえ予言している。カルノーの定理は、あらゆる熱機関は低温側温度T1と高温側温度T2の比から計算される理論値を超えられないとするものであるが、この原理に則って、これまで、効率上昇のため熱機関の温度を上昇する努力を延々と続けてきた(ムーンライトもその一環である)。実際に、あらゆる熱機関の実用効率を、高温側温度をパラメータにプロットすると、実用効率は理論値のほぼ75%の線をたどっていることがわかる(25%は不可逆損失に相当するが、これは結果としてそうになっているだけで理論的な裏付けがあるわけでない)。

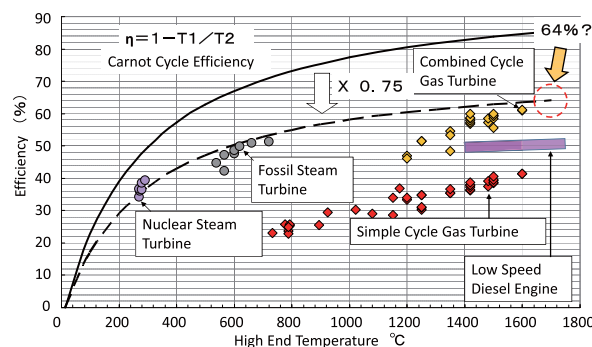


Fig. 5 Challenge to the Carnot cycle efficiency

コンバインドサイクルの効率も例外なく、カルノー効率の75%線を動いている(図5)。

これによると1600°C～1700°C付近でカルノーの式の性質上、効率上昇はほぼ飽和状態になり、到達可能な効率は64%付近となる。熱機関である限りカルノーの定理を乗り越えることはできないので、温度上昇による効率改善に限りがある点、頭に入れておくべきだろう。ムーンライトの時代に1100°Cを1500°Cに上昇することによる効率改善の効果に比べれば、1600°Cを超えるレベルでの温度上昇の効果は全く様相が異なってくる。基本的には今後の効率改善は努力の割には効果が少ないと考えるべきである。現在、1600°C+, 効率63%付近まで到達している商業機を、あと少しの伸び代のためレヒートサイクルを持ち出すか否かであるが、たぶん答えは否と思う。燃料電池SOFCによるトリプルサイクルと同様に、経済性、運用性を考えると実現の可能性は極めて低いと言わざるを得ない。30年前にムーンライトで55%が限界と思って挑戦したものが、これまでの努力で、63%付近まで進展してきただけでも上出来とすべきで、高温化によるカルノー効率への挑戦はこのあたりで諦める時期に来ているのかも知れない。再びカルノーの言葉を引用すると「熱機関の高効率化は満たすべき要件のひとつに過ぎず、それ以上に信頼性/堅牢性/寿命/コンパクトさ/製造コスト等々優先すべき項目が多い(高効率を目指すあまり他を犠牲にするのは良くない)」。この200年前の金言を我々カルノーの弟子としては心に刻んでおくべきである(ムーンライトの計画時にこの言葉を思い出せば良かったが)。

然るに、ここまで発展してきた産業用ガスタービンの技術を今後何に生かすのか? 現在、何をするにしても、30年前のムーンライトと同等以上の挑戦的な目標が作れるか? 候補としては、

- ①「原子力ガスタービン(高温ガス炉)」
- ②「再生可能エネルギーでの活用(太陽熱等)」
- ③「水素・酸素燃焼ガスタービン」
- ④「CAES」(圧縮空気エネルギー貯蔵)
- ⑤「負荷追従型ガスタービン(再生可能エネルギーの皺取り電源)」

⑥「CO₂超臨界ガスタービン」

⑦「国産航空ジェットエンジンへの本格的参入」

等々挙げられるが、絞り込みは難しい。キーワードは「省エネ」「エネルギー貯蔵」「脱炭素」であろうが方向性を見出すのにもう少し時間がかかるのかも知れない。ガスタービンの未来については、次にやるべきテーマの選定も含めて、是非とも若い技術者に徹底的に議論して貰いたいと思う。その際、ムーンライトの精神（魂）を大切にしつつ、実践面ではムーンライトを反面教師（？）として活用したら良いと思う。

13. おわりに

以上、ムーンライトに対して少々辛口の評論となったが、それにしても、当時の関係者の情熱には頭が下がる。日の出の勢いであった70年代から80年代にかけての、日本の国としての勢いと爆発力を感じる。あれだけバラバラの混成部隊をプロジェクト的にも、また技術的にもまとめ上げた実力は並大抵ではない。ただし、狙う方向に狂いあり、ものすごい努力をした割には成果が限定的であるのが残念である。もちろん、間接的に国内メーカを育てた功績は大きいですが、国家プロジェクトのあり方について、ムーンライトの教訓を忘れずに、今後に生かすべきと思う。

ガスタービンの終焉は熱機関の終焉でもある。300年続いた熱機関発展の最終ランナーとして、もう一絞り知恵を出す時期にきている。

特集：大型プロジェクトに学ぶ：航空機エンジン及び発電タービン技術・産業の将来への提言

ムーンライト高効率ガスタービン開発とKawasakiガスタービン

Development of Moonlight Gas Turbine and Kawasaki GT



森 建二^{*1}
MORI Kenji

キーワード：高効率ガスタービン，ムーンライトプロジェクト，燃焼器，低酸素空気燃焼，高温化技術
High Efficient Gas Turbine, Moonlight Project, Combustor, Vitiated Air Combustion, High Temperature Technology

1. はじめに

筆者は、長年にわたり川崎重工業(株)のガスタービン(以下、Kawasaki GT)の研究開発に従事するとともに、多くの国家プロジェクトにも参画し、約35年前のムーンライト計画「高効率ガスタービンの研究開発」(以下、MLGT: '78-'87)プロジェクトにも深く携わってきた。

本稿では、筆者等が川崎重工業(株)(以下KHI)で実施したMLGT研究開発の状況を振り返って紹介するとともに、Kawasaki GTの開発との関連や国プロについても述べることにしたい。なお低酸素空気燃焼に関してはデータも殆どないので少し詳細に記載している。

時間の経過と共に記憶も薄れMLGTのデータも散逸していることから、幾分、散文的な解説になることをご容赦願いたい。

2. MLGT燃焼器の研究開発

KHIは、MLGTの高温再燃焼器(RC)、高压燃焼器(HPC)の研究開発を分担し、パイロット機およびプロト機(HTDU)での実証試験を成功裏に終了した⁽¹⁾。

MLGTは、世界に類を見ない本格的なリヒートガスタービンであり、本誌別稿で述べられているように、当時の世界最高効率(パイロットで50%、プロト機で55%)の複合サイクルを構成するもので、高压縮比と高温の再燃焼に大きな特徴を有している⁽²⁾。

2.1 燃焼器の基本設計

表1にパイロットおよびプロト燃焼器の設計点条件を示す。当時の産業用ガスタービン燃焼器の設計点最高温度は1100℃程度であり、高压燃焼器の1300℃～1400℃は、最先端技術への挑戦であった。また、5 MPa (50

Table 1 Specification of design point for MLGT combustors

GT Plant	Pilot (AGTJ100A)		Proto (AGTJ100B)	
Combustor	HPC	RC	HPC	RC
P1 (MPa)	5.6	0.9	5.3	0.8
T1 (K)	733	1008	737	1061
O ₂ 1 (vol. %)	19.3	12.4	19.4	11.2
T2 (K)	1573	1444	1673	1473

HPC: High Pressure Combustor, RC: Reheat Combustor

1: Combustor Inlet, 2: Combustor Outlet

気圧)を超える圧力での燃焼器は、当時の航空機用ジェットエンジンの35気圧レベルをもしのぐ未知に近い領域を目指したものであった。

さらに、再燃焼器は入口温度が700℃レベルと極めて高温で、入口酸素濃度も12%レベルと通常空気の1/2程度の酸素濃度しかなく(vitiated air)、ガスタービン燃焼器として実現するかどうかから出発せざるを得ない状況であった。

一方、MLGT全体の基本設計を早急に進める必要があり、当時の先進的GT燃焼器を参考にスワラ保炎による拡散型燃焼器構造を採用し、空力・混合特性を主体とした基本設計法⁽³⁾に、表1の仕様に対する推論を加えて燃焼器の基本寸法・緒元を決定した(仮の原型燃焼器)。

多くのガスタービン燃焼器は、従来の実績をベースにシリーズ化や実験等で得られた新しい高度化技術を付加して開発されるが、MLGTはベースとなる燃焼器がなく、ゼロベースからのスタートとなった。

表2に原型燃焼器の基本寸法を、図1にはRCの基本構造(1缶分の断面)を示す(RCは12缶、HPCも10缶の多缶型で類似の基本構造としている)。

低酸素空気に対しては、実効空燃比の概念による修正を加えて基本設計を行うとともに、同時並行的に低酸素

原稿受付 2016年8月27日

*1 元 川崎重工業(株) 技術監

〒651-2274 神戸市西区竹の台5-20-78

Table 2 Characteristic size of MLGT combustors

Combustor		HPC	RC
Number of Can	—	10	12
Diameter of Liner	m	0.170	0.410
Diameter of Flow guide	m	0.220	0.530
Length of Liner	m	0.500	0.900
Length of Transition	m	0.300	0.600

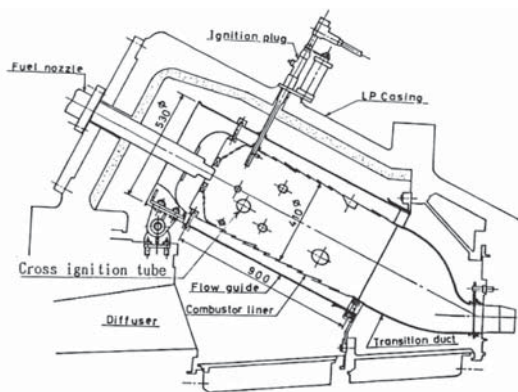


Fig. 1 Basic structure of rehear combustor (1 Can-segment)

空気での燃焼試験を実施し、その実現性を確認することとした。

また、燃焼器への均一な空気流入を確保するために燃焼器ライナー（内筒）の周りに同心円状のフローガイド（外筒）を採用したことも重要な決断であった。図2にフローガイドの効果を確認した水流可視化試験の結果を示す。最新のGTは何らかの方法でフローガイド的なものを備えて燃焼器流入空気の均質化を図っており、先見性があったと考えられる。燃焼器ケーシング内の流れの片寄に煩わされることなく開発が進行し、開発期間も短縮できたものと思われる。

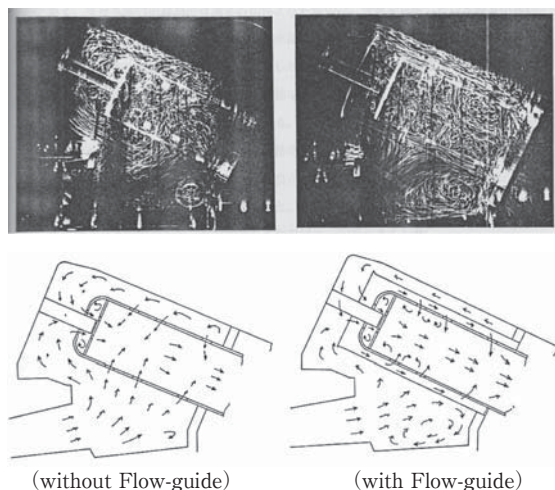


Fig. 2 Water flow test of transparent model

2.2 低酸素空気での燃焼特性 — 先行基礎試験

低酸素・高温空気（vitiated air）で作動するRCがMLGTの成否を握るとも考えられ、早急に技術的可能性

を確認する試験を行う必要があり、先行基礎試験を開始した⁽⁴⁾。

試験は、図5と同様の燃焼試験装置を用い水蒸気添加のみでVitiated Airを模擬している。供試燃焼器としては現有のKawasaki M1 GT燃焼器（M1モデル）を用いた。

図3に基礎試験による低 $(O_2)_1$ 燃焼特性を示す。燃焼効率 η_b は酸素濃度 $((O_2)_1)$ の低下と共に低下し、rich側・lean側の火炎の吹消え（B.O.）が早くなり、可燃範囲が狭って、ついには可燃領域がない低 $(O_2)_1$ 燃焼限界となる。一次燃焼領域の理論当量比 $(\phi_p=1)$ が可燃限界の最小酸素濃度 $((O_2)_{cri})$ となり、 T_1 が530Kでは、

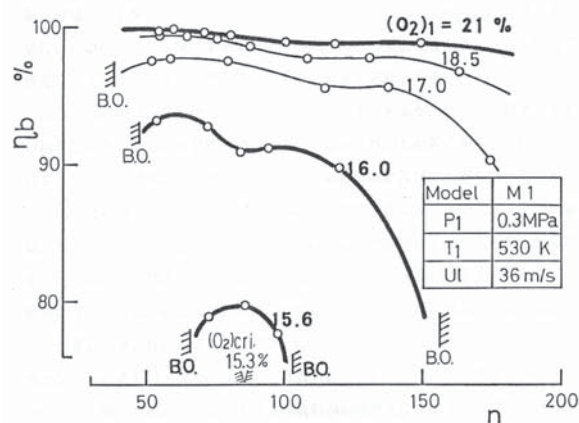


Fig. 3 Combustion performance for low $(O_2)_1$ — model Test
 η_b : Combustion efficiency, B.O.: Blow out lame,
 P_1, T_1, U_1 : Inlet press., Temp., Reference velocity, n : Air fuel ratio

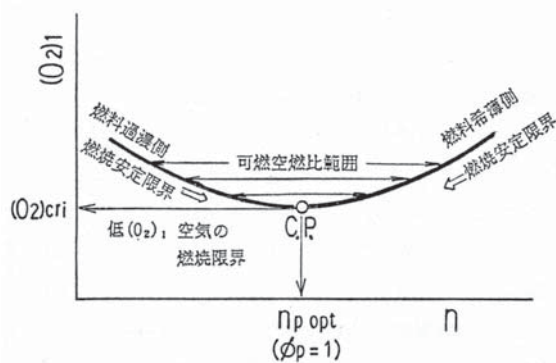
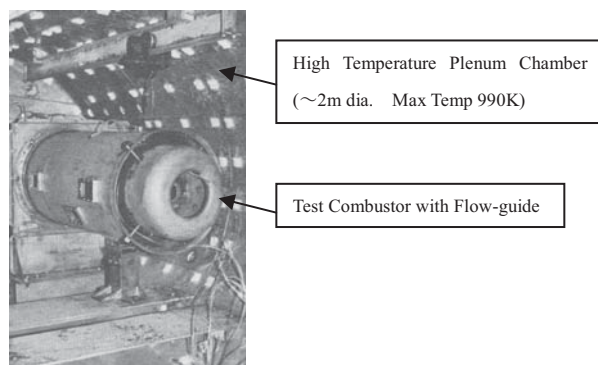
Fig. 4 Combustion characteristics for low $(O_2)_1$ — Image

Fig. 5 Inside view of test chamber with test combustor

(O_2)₁ 15%が限界である。図4に、低 (O_2)₁燃焼限界の概念図を示す。

更に、パラメータ試験により P_1 , T_1 , U_1 の影響を調べ、 T_1 の影響が最も重要であることが判り、低酸素空気での燃焼特性が明らかになった。

続いて、RC基本設計の一環として、図5に示す燃焼試験装置でRC原型燃焼器の常圧燃焼試験を行い、その燃焼器特性を把握するとともに、改良のためのデータを把握した。vitiated airは、予燃焼器と水蒸気付加により所定の温度・酸素濃度に調節され高温容器に流入する。

図6に示されるように、 T_1 を65K上げる毎に、燃焼限界 (O_2)_{crit}は1%改善されることが、基礎試験結果と同様に明らかになるとともに、斜線で示すRCの作動条件では可燃限界に対して十分余裕がありMLGT燃焼器として成立することが確認された。

図7に、RC原型燃焼器 (RCLT1) の常圧燃焼試験結果を示す。(O_2)₁12.4%でも、入口温度が990Kと高温のため十分高い燃焼効率が得られている。

これにより、本格的なRC開発が可能となった。

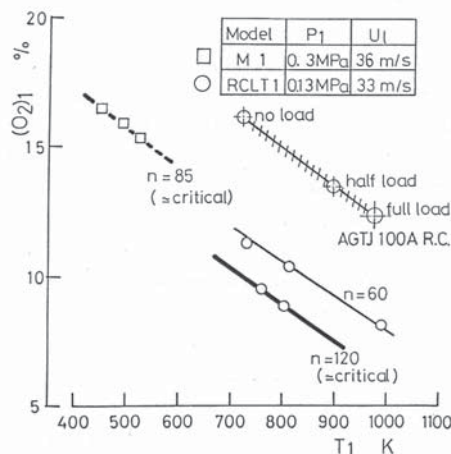


Fig. 6 Inflammable limit for vitiated air --- (O_2)₁ vs. T_1

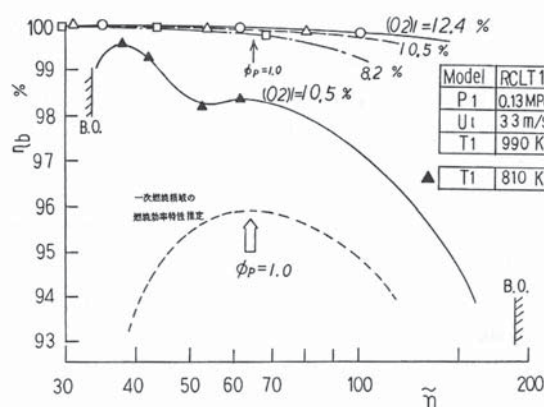


Fig. 7 Combustion performance of RC model combustor

2.3 高温再燃焼器 (RC) の開発^{(5),(6)}

2.2のvitiated air燃焼試験結果を踏まえて、RCの開発が進められた。常圧燃焼試験、実圧燃焼試験を実施して、

原型燃焼器に改良を加えて実機RCを決定した。実圧燃焼試験は、MHI高砂製作所の大型要素試験設備を借用した (国プロ故に重要な研究開発設備が借用できた)。

主な試験項目は、要求される燃焼性能 (燃焼効率、圧力損失、出口温度分布 等)、壁温分布、燃料噴射弁性能、排ガス性状 (NO_x , 煤煙)、着火火移り性能 (火炎伝搬管性能) 等である。以下に、トピック的な事項を記述しておくこととする。

1) 燃料および燃料噴射弁 当初は灯油燃焼が検討されたため、空気アシスト型燃料噴射弁を開発した。開発された噴射弁は良好なターンダウンと燃焼特性が得られたが、周囲温度が700℃レベルと極めて高いために、温度差による内部リークの問題を生じている。途中でガス燃料 (LNG) に設計変更されたため、新たに多孔式ガス噴射弁を開発するとともにリーク問題は重要ではなくなった。

NG燃料では、 NO_x を含む排ガス特性、壁温などを含め、GT燃焼器に有利に働く。LNG導入時期であったことは、MLGTにとって幸いであつたろうし、その後の日本におけるGT隆盛の隠れた要因となったとも言えよう。

2) NO_x 図8に示すように、低 (O_2)₁燃焼では高温条件であっても NO_x の発生は指数的に低くなる。Vitiationにより火炎温度が低下することが要因であり、断熱火炎温度に基づく理論計算 (図8の実線) とほぼ一致する。

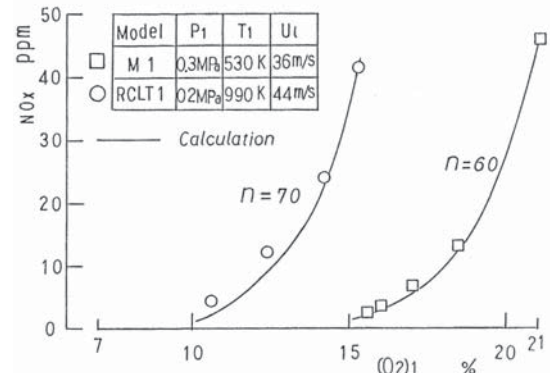


Fig. 8 NO_x emission under vitiated air combustion

3) 燃焼器ライナー壁温 基本的にフィルム冷却を採用している。ライナー (内筒・尾筒) 壁温上昇 (ΔT_w) も火炎温度および輻射率低下のため小さくなるが、冷却空気自体が700℃レベルのvitiated airのため、壁温 (T_w) 自体は高く、火炎も伸びることへの対処工夫も必要であった。図9に実証試験に用いたRC内筒写真を示す。

ちなみにRCライナ許容メタル温は900℃である。

2.4 高圧燃焼器 (HPC) の開発⁽⁵⁾

HPCは当時類を見ない50気圧を超える高圧燃焼であり、圧力の影響が懸念されるが、従来技術の延長線上にあると考え、原型燃焼器をベースに常圧燃焼試験に加えて、10気圧レベルの中圧燃焼試験を行い、RCと同様な



Fig. 9 AGTJ100A RC liner for GT operation

手法でHPC実機開発を進めた。

50気圧レベルの火炎輻射率など各種基礎データは、三鷹にある（当時の）航空宇宙技術研究所（NAL）で取得した。

さらに、50気圧までの高圧試験設備が同所に設置された後、1/2スケール燃焼器ではあるが、実圧での燃焼確認試験が行われた。トピックス的な事項を記述しておく。

1) 燃料噴射弁（多孔ガスノズル） 高圧下では噴射角が狭くなっていくので留意する必要がある、時に燃焼火炎の遷移や吹消現象が起きうる。

2) NO_x 高圧高温の拡散燃焼であり、高いNO_x が排出されるが、前述のように再燃焼器のNO_x が極めて低く、GT全体としては出口脱硝で対応可能なレベルである。念のために、燃料噴射弁はNO_x 低減用水噴射付としている。

3) ライナー壁温 50気圧レベルでも、燃焼性能等は従来の拡散燃焼の延長上での扱いが可能であることが確認されたが、高圧での火炎輻射の増大や高温燃焼のためライナー冷却は試行錯誤的な再調整が必要であった。HPCの尾筒はインピンジ冷却を採用し、内筒、尾筒とも内壁に遮熱コーティング（3層構造）を施行した。

4) 高温部材 フローガイドや燃焼器支持材等はハステロイX、内筒・尾筒など直接燃焼火炎にさらされる部材は耐酸化性を重視してHA188を選定している（RCも同じ）。

5) 火炎検知システム 高圧では、市販の火炎検知装置は、覗き窓に使う肉厚ガラスの紫外線吸収が大きいため信頼性がない。MLGTでは、石英ライトガイド（ファイバー）で火炎を直接観察できるシステムを開発装着し、制御室でのTVモニターを可能にした。タービン出口温度計（熱電対）による通常の着火・吹消確認システムの他に運転中の火炎を直接見て燃焼状況を知ることは、特に、開発段階に有効な手法であると言える。

図10に実証試験に用いたHC内筒写真を示す。

2.5 新形式高温燃焼器の開発

プロト機（1400℃～1500℃；熱効率55%が目標）については、高温高速タービン試験装置（HTDU）による実証試験となり、キーとなる高温タービン、高温燃焼器の実寸実温試験が行われた（圧力のみ10気圧レベル）。



Fig.10 AGTJ100A HC liner for GT operation

燃焼器については更なる高温化が可能な新形式燃焼器として積層構造ライナーを開発し、HTDU運転試験で良好な冷却性能を確認した。2枚の耐熱材料を多数のピンで固定しインピンジ冷却をしながらピン層の間を対流冷却し、最終的に滲みだし冷却により燃焼等内壁に冷却空気を放出する構造で、高度な製作加工技術が必要となる。

図11にHPCを想定した積層構造燃焼器内筒の外観と構造説明、図12に壁温計測結果をフィルム冷却構造燃焼器と比較して示す。積層構造では、 T_w の均質化に加えて T_w MAXも100K程度の改善（低下）が得られている。

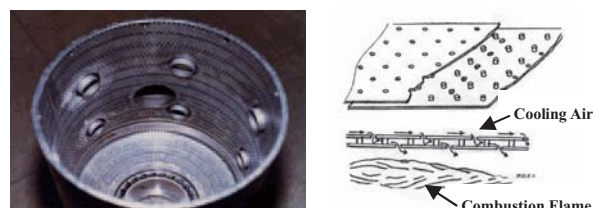


Fig.11 Laminated combustor liner --- Advanced design

他に、セラミックタイル燃焼器なども開発し、燃焼試験を無事終了したが、取扱い面等で次期尚早と判断した。

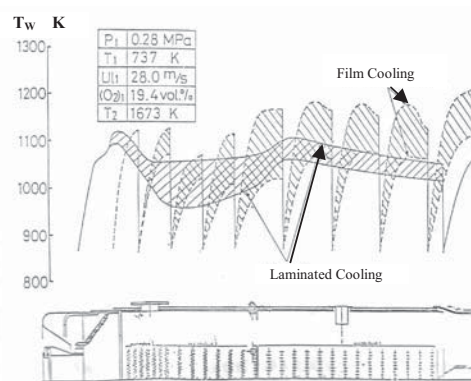


Fig.12 Laminated combustor liner ---Wall temperature

3. MLGTプロジェクトとKawasaki GT

前章においては、KHIが主担当である燃焼器についてMLGT開発を記述したが、他に、高温タービン、軸流圧縮機、GTプラントの運転・制御などの先進技術開発に若手技術者を中心に多くの技術者が関与している。

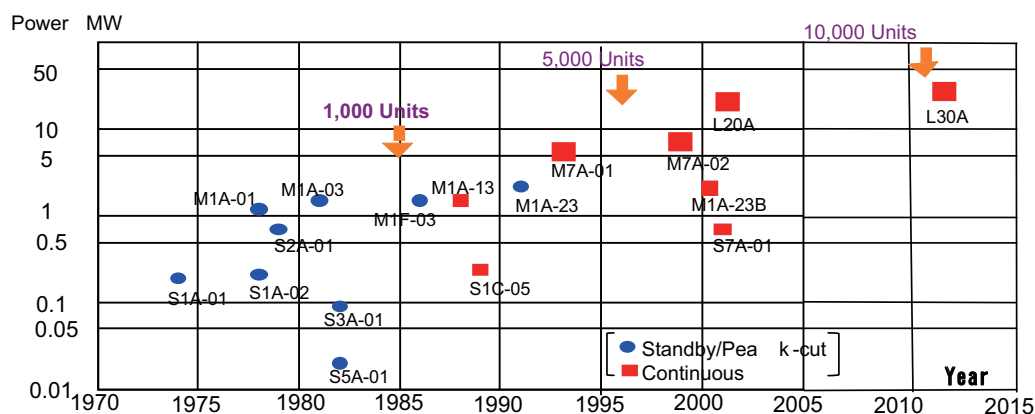


Fig.13 Developed Kawasaki gas turbine

これらの技術者は、KHIのGT開発に深く関わっており、MLGTの研究開発経験や先端技術へのチャレンジ精神が、KHI GT開発に直接的・間接的に大いに寄与していることは疑いの無いところであろう。

以下、Kawasaki GTの開発とMLGT技術等の関連を個別事例も含めて記述することにする。

3.1 Kawasaki GTの開発推移

KHIは1970年代から純国産の中小型GTの開発に着手し、2011年には累計販売台数が1万台に達している。

図13に、KHIにおけるGT開発の経緯を示す。当初は非常用発電の小型GT (S1,M1) 中心の事業展開であった。

MLプロジェクトが推進された'80年代はコージェネ市場への進出を目指した常用発電GTの開発時期にあたり、M1A-13 (1500KW級) の開発に続き、中型GT M7A (7 MW級) への展開を図っていった。

M7Aは、従来の遠心圧縮機+単缶型燃焼器構造から、高温高効率化・大型化に適した軸流圧縮機+多缶型燃焼器構造を採用した最初のモデルであり、Kawasaki GT大型化の出発点ともいえる。図14にM7A外観図を示す。

引き続き2000年代には、20MW級のL20A、続いて30MW級のL30Aを開発し市場投入した。

表3に軸流圧縮機を採用したKawasaki GTの代表的性能を示しているが、高温・高圧化を含む高効率技術の採用に加えて、低NO_x燃焼技術の実用化により、中型GTとして世界最高水準の性能を達成している。各モデルは、各々シリーズ化され多様なニーズに対応している。

特に、M7Aの開発はMLプロジェクトと時期的につながっていることもあり、MLGT開発の技術者が多数参画した。高温・高圧・高効率化や環境適応型燃焼技術など

Table 3 Characteristic performance for Kawasaki GT

Type	M7A	L20A	L30A
Entry Year	1993	2001	2012
Output Power	6～ Mw	18～MW	30～MW
Thermal Efficiency	30～%	35～%	40～%
Pressure Ratio	12.7～	20～	25～
Turbine Inlet Temp.	1300 K～	1500 K～	1600 K～
NO _x (O ₂ =15%)	～25ppm	～20ppm	～15ppm

の先端的な要素技術の導入にあたってMLGTプロジェクトの成果・経験が大いに生かされたと言えよう。

3.2 先進要素技術の採用

世界水準にあるKHI中型GTでは、MLGTで培った先進要素技術が広く応用展開されている。以下に個別事例を紹介しておく。

1) 追焚き方式低NO_x燃焼器 (Dry Low Emission : DLE) KHIは環境適応型DLE燃焼器として、追焚きバーナによるシリーズ燃焼方式を採用している (図15)。MLGT RCはHPC燃焼ガスをシリーズ燃焼しているが、高温・低酸素濃度のRC再燃焼では、燃焼性は確保される上にNO_x排出が極めて少なく、条件によっては高温脱硝されることが示されている。これを応用して、希薄予混合燃焼 (DLE) を採用した1次燃焼に続き、2次燃焼として追焚きを加えたシリーズ燃焼 (再燃焼) により、高温高負荷燃焼でもNO_x<15ppm (O₂= 15%) を達成している。

2) ジェットエンジン用積層構造燃焼器 MLGT HCプロト用に開発された積層構造ライナーは極めて良好な壁面冷却性能を示しており、高負荷・高温になる航空用JEの燃焼器に応用されている。図16に積層構造を採用

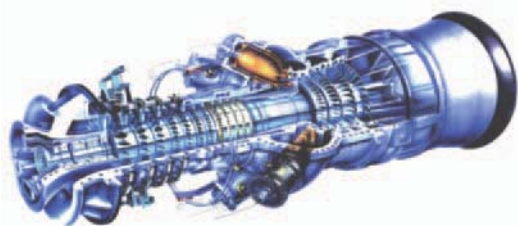


Fig.14 General view of M7A GT

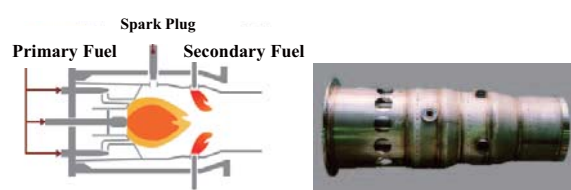


Fig.15 M7A DLE combustor (Series combustion)

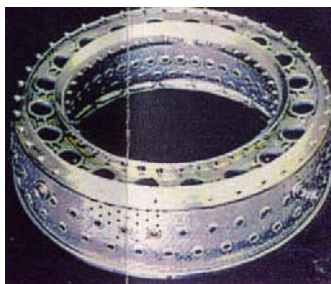


Fig.16 Laminated annular combustor for jet engine

した航空用アニュラー燃焼器を示す。

3) 多缶型燃焼器の構造 MLGTのHPC,RC共に多缶型燃焼器であり, 設計思想や試験データを参考にKHI 中型GT燃焼器構造が開発された。特に火炎伝搬管や尾筒についてはKHI GTでは初めての実用化であったが, MLの経験を活かし, リスクを減らしながら開発期間を大幅に短縮することが出来た。

4) 高温化秘術など MLGT開発参画により, コーティングを含む高温材料やタービン翼冷却技術などの高温化技術の他, 多段軸流圧縮機の特長や運転計測技術を含め多くの高性能化データが手元にあったことが, Kawasaki GT開発に有形無形の形で大いに貢献したといえる。

5) その他 ‘燃焼器の川重’ という評価も, チャレンジ的なMLGT燃焼器の開発達成が大きく後押ししているといえよう。

4. MLGTプロジェクトの評価

MLGTプロジェクトに対しては, GT メーカーや研究機関が一丸となって実証運転を含めた開発を行い先進的技術目標が達成されたことに対して, 高い評価がある一方, プロジェクトで対象としたリヒートGT自体が実用化されなかったこと等を取り上げて, 低い評価をしたもの(産業構造審議会評価部会[2000])もあるとの報告⁽⁷⁾がある。

私見ではあるが, 大型の国家プロジェクトの評価は, 人材育成も含めて日本の産業構造の根幹の部分がいかに強化され, その分野の発展にどう繋がったかという大局的な視点でなされるべきではないかと思う。

プロジェクト製品の市場化の成否のみを主体にした評価は, あまりにも短期的・近視眼的で, 国を挙げたプロジェクトに対して相応しいとは言えない。近年, 世の中の全ての方向が, 短期的・即効的側面に偏っているように感じているのは筆者だけであろうか?

いずれにしろ, 当時の世界最先端技術を目指したMLGTプロジェクトが, 日本のGTの黎明期に実施されたことにより, 多くの人材も育成され, 世界レベルの技術を推進して, その後の日本のGT事業の発展に大きく貢献したことは間違いないことと思われる。また, 世界が日本のGTに注目する契機にもなったのではないかと考えられる。

GT学会誌 (May 2016) の会長就任挨拶⁽⁸⁾でも, 冒頭に, FJRプロジェクトと共にMLGTプロジェクトが我が国のGT産業発展に結び付いたことが触れられている。

5. おわりに

KHIが主担当であった燃焼器を主体にMLGTの開発について紹介するとともに, Kawasaki GTへの波及効果等についても技術事例を含めて記述し, 国家プロジェクトとしてのMLGTの評価についても私見を述べた。

このような大型国家プロジェクトは, 将来の産業構造を見極めたいうで, その黎明期に推進し, 世界最先端の技術水準を目標に, 要素技術にとどまらず実証運転等, 実用化に必要な技術まで含めた内容であることが重要ではないかと考えられる。また, プロジェクト推進に当たっては, 人材育成を含め, 産業技術の根幹を強化していくという幅広い視野が必要であろう。

本稿が, 将来の日本のGTを担っていく関係者に有用な示唆を与えるものであればと願っている。

(補足)

リヒートGTについては, 1990年代にABB社が大容量発電用GTとしてGT24, GT26を実用化している。MLGTと比べて中間冷却をせず, 環状型燃焼器を採用してコンパクトなGTとなっている。また, HPC, RC共に, 環状配置された半円錐 オフセット状の希薄予混合バーナ (EV, SEV) の採用により, NO_x排出量が極めて低い 環境対応型GTとなっている。

引用文献

- (1) 高効率ガスタービン技術研究組合, ムーンライト計画高効率ガスタービン研究開発10年の歩み (非売品)(1988)
- (2) 竹矢一雄, 高効率リヒートガスタービン, 日本ガスタービン学会誌, vol. 18, No. 30 (1980), pp. 3-12.
- (3) 森建二, 北島潤一, ガスタービン燃焼器の基本設計プログラム, 川崎重工業社内研究報告書, (1975).
- (4) Mori, K., Kitajima, J., Kimura, T., and Miki, S., Preliminary Study on Reheat Combustors for Advanced Gas Turbine, Trans. of ASME, Journal of Engineering for Power, vol.104, (1982), pp. 1-8.
- (5) Mori, K., Kitajima, J., Kimura, T., and Enzaki, Y., Research and Development on Combustors for Advanced Reheat Gas Turbine, Proc. of the 1983 TOKYO international Gas Turbine Congress, (1983), 83-TOKYO-IGTI-21.
- (6) 森建二, ガスタービン用高温再燃焼器の燃焼特性とそれに基づくその設計開発法に関する研究, 昭和60年度慶應義塾大学博士論文 (1986).
- (7) 電力中央研究所報告, ガスタービン開発における国プロの役割一「高効率ガスタービンプロジェクト」についての事例分析一, (2008).
- (8) 久山利之, 2016年度会長就任挨拶, 日本ガスタービン学会誌 (2016), vol. 44, No. 3, p. 1.

特集：大型プロジェクトに学ぶ：航空機エンジン及び発電タービン技術・産業の将来への提言

ターボ機械（蒸気タービン及びガスタービン）初号機の開発と苦闘

Development and Hard Struggle to Produce First Unit of Turbomachinery (Steam Turbine and Gas Turbine)



大地 昭生^{*1}
OHJI Akio

キーワード：蒸気タービン，ガスタービン，火力発電プラント，コンバインドサイクル，地熱発電プラント，ターボ機械
Steam Turbine, Gas Turbine, Thermal Power Plant, Combined Cycle, Geothermal Power Plant, Turbomachinery

1. はじめに

ターボ機械は現代社会において各種産業を支える基幹技術である。

筆者は半世紀にわたりターボ機械の中でも蒸気タービン及びガスタービンの開発，設計，建設に関わり様々な経験を積む機会を得た。この中で初号機を開発する時の失敗経験とその中での苦闘は今後のターボ機械に関わる技術者の参考になると思いこの企画の執筆を引き受けることとした。

筆者が大学を卒業し企業へ就職したのは1964年で今から半世紀前になる。この年は東京オリンピックが開催され，これに呼応して新幹線が開通した年でもある。

これまで7時間近く掛かっていた東京－大阪間はわずか4時間で結ばれた。また，経済的には池田勇人内閣が所得倍増計画を掲げ発足し，戦後の復興が一段落し高度成長に向け走り出した年でもあった。これに呼応し電力需要もうなぎ上りに上昇した。

電力供給はそれまでの水力発電が主体の水主火従から電力需要の急増に対応するため火力発電が主体の火主水従へ移行した年でもある。火力発電はボイラと蒸気タービンで構成される汽力発電が主体である。原子力発電はまだなく，ガスタービンも電源の主力ではなかった。これらの電源が主力電源になるのは原子力発電は1970年以降，ガスタービンは1980年以降である。

本稿が今後，ターボ機械に従事する若手技術者への参考になれば幸いである。

2. 蒸気タービン国産1号機の開発

入社当時は，これまでの水力発電から火力発電へ電力

供給の主体が移行したため，重電各社とも火力発電主体の設計，開発，製造体制へ移行した。

筆者も東芝の蒸気タービン設計部門に配属された。これまで，蒸気タービンは石川島芝浦タービンで製作されていたが入社前の1961年に東芝と合併し，東芝で蒸気タービン，発電機を一気通貫で製作出来るような製造体制になっていた。

また，蒸気タービンの製造工場も拡張され年間500万kWが製造可能なタービン西工場が完成した。火力発電は急激な容量増加に対応するためGE社と技術提携し蒸気タービンの製造が行われていた。電力会社は1号機をGE社から輸入し，2号機以降を国産とする政策を取っていたが東芝はインチミリ換算だけでそれ以外の変更は絶対認めないと厳命されていた。GEから提供されるのは設計製作図だけで設計手法は提供されなかった。しかし，これでは蒸気タービンの自主技術が育たないのでGE技術から脱却し東芝の独自技術を確立しようという機運が高まっていた。

筆者が最初に関わったのは156MWの蒸気タービンであった。

それまでの156MW蒸気タービンはGEの設計を踏襲し既に5台製作していた。

このタービンは独立した高圧タービンと中圧及び単流の低圧タービンが一体となった中・低圧タービンと複流の低圧タービンの3車室から構成されていた。このタービンの難点は高温のクリープ強度を要求される中圧タービンと低温で靱性を要求される低圧タービンを1本の軸で構成する必要があった。また，鋳造の中圧ケーシングと銅板溶接構造の低圧ケーシングをフランジで結合していたため接合フランジ部からの蒸気漏洩事故を経験していた。このため，これらの問題を解決した国内メーカーが独自技術で開発した蒸気タービンを採用しようという

原稿受付 2016年6月15日

*1 東北テクノアカデミア産学連携事務所
〒247-0026 横浜市栄区犬山町27-10

電力会社も現れ始めていた。このため、高温部を一つに集約し高・中圧部を一体化して高温部に適合したクリープ強度の高い材料を採用し、また、低温部は単流の低压タービンと複流の低压タービンを組み合わせたトリプルフロー型低压タービンを採用してこの部分には靱性の高い低压タービンロータを採用した新型の156MW蒸気タービンを開発することが決定された（図1）。

完全な自主設計で独立した単流の低压タービンの製作は初めての経験であった。

単流の低压タービンは軸長が短く固有振動数が高くなることが想定されたため、軸受は剛性が高く振動に強いパッド軸受が採用された。固有振動数の計算は多軸系の振動計算技術がまだ、確立しておらず剛体支持のシングルスパン（単軸の剛体支持）で計算し、運転周波数から離調していることを確認していた。試運転に入ると定格運転回転数付近でラビング振動が発生し何度もトリップを繰り返した。当初、単流低压タービンの鋼板溶接ケーシングが熱膨張で押され軸方向の接触が発生しているのではないかと懸念があったためケーシングを開放して見たが軸方向の接触は見られなかった。丁度、この時、軸受部の剛性を考慮に入れた多軸系の振動解析コードを開発中であった。試験的にこの解析コードを使用して解析して見たところ単流低压タービンロータの固有振動数が定格運転数付近にあることが確認された。既に完成している単流の低压タービンを変更することは出来ないため、剛性の高いテイルテイングパッド軸受を通常使用している楕円軸受に戻し軸受の剛性を下げた。この状態で再計算して見ると固有振動数が離調していることが確認された。そこで、この状態で再起動して見ると定格運転状態での振動は収まり何とか納期限内に引き渡すことが出来た。この間、ユーザ、メーカー一体となって解決に奔走したが暖かく見守って頂いた当時のユーザには深く感謝している。この経験はその後の多軸系の振動問題解決に貢献した。現在では多軸系の振動計算は伝達マトリッ

クス法を用い、軸受け部のバネ定数、ダンピング定数も加味して正確な固有振動数の把握が可能となっている。また、軸系の連結方法も各ロータのカップリング部に極力曲げモーメントを掛けないオンアラインメント法が適用され、回転部と静止部のクリアランス設定も運転時のケーシングの真空荷重による変形、軸受け内のロータの浮き上がり、偏心等細かい配慮がなされ振動問題は解決している（図2）。

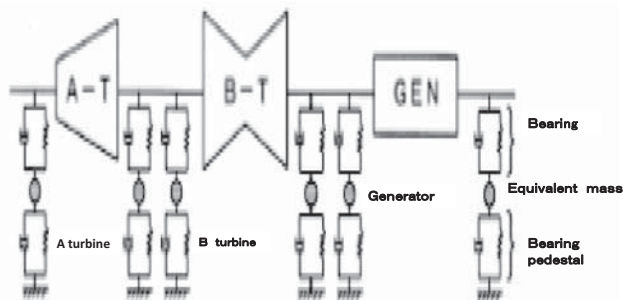


Fig. 2 Calculation model of multi shaft vibration analysis

3. 地熱発電用蒸気タービンの開発

次に関わったのが地熱蒸気タービンの設計、製作であった。海外では既に、世界で初めて地熱発電を実用化したイタリアのラルデレロ、ニュージーランドのワイラケイ、アメリカのガイザーズ等で地熱発電が運用中であつた。しかし、我が国ではどこも地熱発電を実用化していなかった。我が国は火山国で地熱資源が豊富であり地熱発電には適している。これを実用化しようと言う機運が当時、高まっていた。そこで、地熱資源開発に興味を持っていた東化工（現日本重化学工業）と組み、蒸気井の開発は東化工が、発電設備は東芝が担当することで合意し開発がスタートした。開発地点は岩手県の八幡平

Matsukawa Geothermal Power Plant



- Steam Supply: TOHOKU Natural Energy
- Generating Dept.: Ditto
- Rated Output: 23500kW
- Commercial Operation: Oct, 1966y
- Location: Matsuo Village, Iwate Prefecture

Fig. 3 The first geothermal power plant in Japan

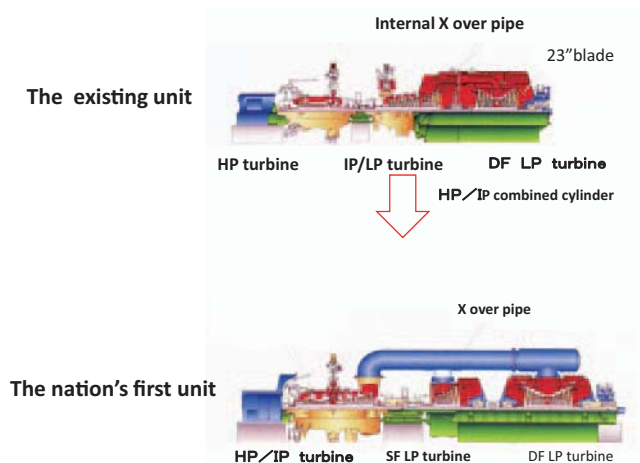


Fig. 1 Cross section of the first steam turbine developed by domestic technology

の松川に決められた。地熱資源が豊富なことは事前の探査で確認されていた。発電出力は事前の探査から20MWと決められた（図3）。

地熱発電はマグマで加熱された熱水を地底から取出し減圧フラッシュさせた蒸気で発電するのが一般的である。しかし、松川の場合は地熱のポテンシャルが高く過熱蒸気が直接噴気していた。蒸気条件は低く火力発電の低圧タービンとほぼ同等であったため、初めて国産で開発した156MWの低圧タービンの単流部分を適用することとした。タービンで膨張した蒸気の冷却は火力発電では表面式復水器が使用され冷却水は海水が使用されるが地熱発電の場合は復水器は直接接触式のジェットコンデンサーが適用される。地熱発電所は山中に建設されるため、冷却水は自然通風式の空気冷却塔から供給された。最近では冷却塔は機械通風式が使用されることが多い。また、噴出した蒸気は大量の不凝結ガスを含むため復水器からのガスの抽出は蒸気エジェクタにより行われた（火力発電では通常真空ポンプを適用）（図4）。

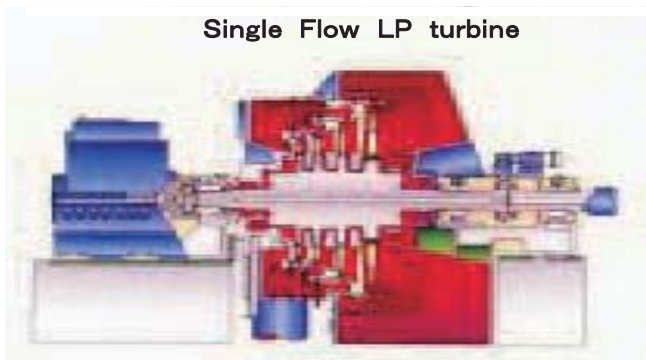


Fig. 4 Cross section of the steam turbine for MATUKAWA geothermal power plant

試運転が開始され、まず、最初に遭遇したのが蒸気井から飛来した土砂と石の流入であった。当然、蒸気タービンの初段の動静翼は破損した。地球がボイラであるから当然予想しなければならないことではあったが、この問題は、蒸気タービン入口部に土砂流入防止のスクリーンを設置することで解決した。しかし、土砂流入が止まってからも度々動翼が飛散した。事前に基本的な材料試験は実施していたが長時間の試験は実施していなかった。腐食性ガスが材料強度にどのような影響を与えるかを十分把握していなかったのが原因であった。長時間の腐食性ガス中の疲労試験を実施した結果、腐食疲労強度が大幅に低下することが確認された。この結果を反映させた十分な強度を有する動翼を再設計してこの問題は解決した。これらの対応は極寒の豪雪の中で行われた為、困難を極め、まさにユーザ、メーカー一体となった七転八倒の対応であった。

当時、このトラブル解決のために対応した方々に対し敬意を表する次第である。

現在、日本企業が世界の地熱発電の70%を占めている

のは各社共、類似した経験を通じて地熱発電技術を確立したものと思われる。

地熱発電は厳しい腐食環境で運用されるため、寿命は火力発電の半分程度である。松川発電所も運用後20年で機器は新製されている。この時、発電所出力も23.5MWに増出力された。地熱ポテンシャルが高く増出力が可能なのが確認されたためである。

運用を終えた蒸気タービンは、現在、カットモデルとして発電所に隣接し設置されたPR館に展示されている。後日、発電所を訪問し、蒸気タービンのカットモデルを視察した際、自分の子供に再会したような感動を覚えた。

松川発電所は運転開始後、半世紀近く運用されておりこれが評価され2016年度の日本機械学会の機械遺産に認定された。

4. 鉄研1号ガスタービンの開発とコンバンドサイクル事業の立ち上げ

4.1 鉄研1号ガスタービンの開発

ガスタービンは蒸気タービンに比べ開発は半世紀遅れ、本格的実用化までには更に半世紀を要した。ここで紹介するのはガスタービンの技術を守り続け実用化に漕ぎ着けた先人達の苦闘の記録である。

世界で最初にガスタービンが開発されたのは第二次世界大戦が始まった1939年前後でイギリス、ドイツで相次いで開発され、その後、いずれも、ジェットエンジンとして戦闘機に搭載された。また、同時期にスイスのBBCが緊急電源用として発電用ガスタービンを開発した。蒸気タービンの開発が1880年代の初頭に開発されたことを考えると半世紀以上遅れている。

我が国でも日米間の太平洋戦争勃発（1941年）を契機にガスタービンを開発しようと言う機運が高まっていた。戦闘機用としてはネ20のコードネームを持つガスタービンが開発され初飛行には成功したが実戦投入までには至らなかった。一方、海軍は高速魚雷艇に搭載するガスタービンの開発を進めていた。このガスタービンの開発・製作は石川島芝浦タービンへ依頼された。石川島芝浦タービンでその開発を指揮していたのは土光敏夫氏であった。土光氏はその後、石川島芝浦タービンの社長を経験した後、IHIの社長を経て東芝の社長も務めた。最後には国鉄民営化を提言した臨調会長も務めた経済界の重鎮である。

物資の不足の中、その開発は困難を極めたがアイドリリング運転までには漕ぎ着けたところで終戦を迎えた。ガスタービン技術は軍事技術であるので当然、戦後、日本の占領政策を進めていたGHQにより全て廃棄するよう指示されその開発も禁止された。

土光氏は戦後のガスタービン技術の復活を信じ、開発中のガスタービンを工場の一角に埋設した。航空機、ガスタービン等の開発を担当していた国の研究所も解体され鉄道技術研究所に吸収され、技術者も温存させた。数

年後にGHQのガスタービン開発禁止令が解除された時、鉄道技術研究所内でガスタービン機関車を開発しようという話が持ち上がった。

蒸気機関車の効率が5%程度であることを考えるとガスタービンの方が効率が良いと判断された。世界ではスイスが既にガスタービン機関車を実用化していた。

戦後の開発資金の不足の中、如何に少ない予算で開発するかも課題であった。その開発、製作を依頼されたのが石川島芝浦タービンであった。当時、土光氏が石川島芝浦タービンの社長を務めていたことも幸いした。早速、埋設されていたガスタービンを掘り起こし修復が始まった。動翼、静翼は折れ曲り無残な姿ではあったがケーシング、シャフトは使えることが判明した。技術研究所から派遣された技術者が工場に常駐し開発、修復を指導した。圧縮機の動翼は戦前のアイドリング運転中破損していたため基本設計から全面的に見直された。燃焼器、ガスタービン動静翼は新製された。

ガスタービンの仕様は最大出力2200PS、ガスタービン入口温度650℃、圧力比3、燃料はB重油とされた。この仕様で熱効率は13%であった。これに対応した機器仕様は圧縮機段数20段、ガスタービン4段であった。高温部の材質は1、2段の動翼、円板はNiCrW鋼、3、4段はCrMo鋼が適用された。

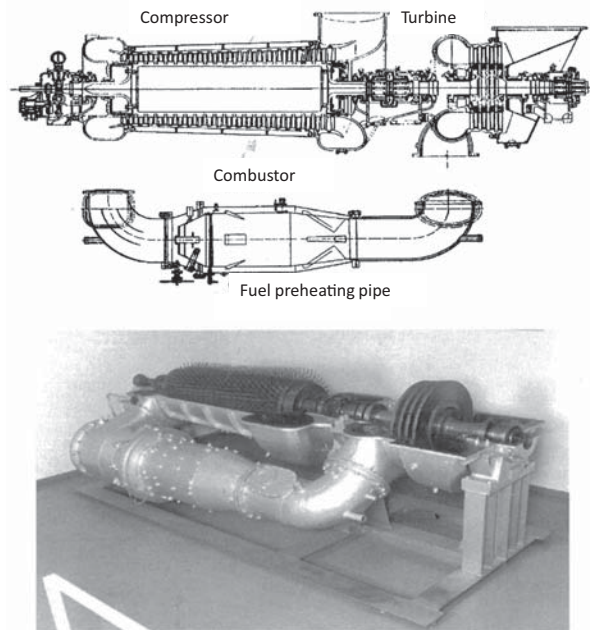
このような仕様で改造された後、1951年、試運転に漕ぎ着けたが燃料のパージ不足のため、高温部品を損傷した。また、動翼が試運転中に破損したため、動翼、円板の材質は全段、NiCrW鋼に変更された。また、燃料はB重油を使用していたため高温部は高温腐食であるバナジウムアタックに悩まされた。その後、効率の良い電気機関車、ディーゼル機関車が開発されたため、ガスタービン機関車が実現することはなかったが、戦後の物資不足、資金不足の中開発されたこのガスタービンが戦後のガスタービン技術者達に光明を与えたことは確かである。このガスタービンは鉄研1号ガスタービンとして現在でも東京電力の電気の史料館に展示されている（図5）。

4.2 コンバインドサイクル事業の立ち上げ

1) 技術提携先の変更（BBCからGEへ）

東芝はその後、世界で初めて発電用ガスタービンを開発したBBCと1958年に技術提携し主として石炭鉱山から排出されるメタンガスを燃料とするガスタービンを数多く製造した。（図6）

しかし、世界では航空エンジンをベースとしたGEのガスタービンが高温化で先行しシェアを拡大していた。戦後、GEは重爆撃機に搭載していたT-180のジェットエンジンをベースにMS3000の発電用ガスタービンを開発した。このガスタービンはベルアイル発電所に納入され長期間運用された。GEはこのガスタービンを基に高温化と大容量化を図りシェアを拡大していった。ベルアイル発電所のMS3000はその功績が評価され1984年ASMEのLANDMARKに指定された（図7）。



Over view of gas turbine

Fig. 5 Cross section & photograph of the first gas turbine developed for the railway research institute

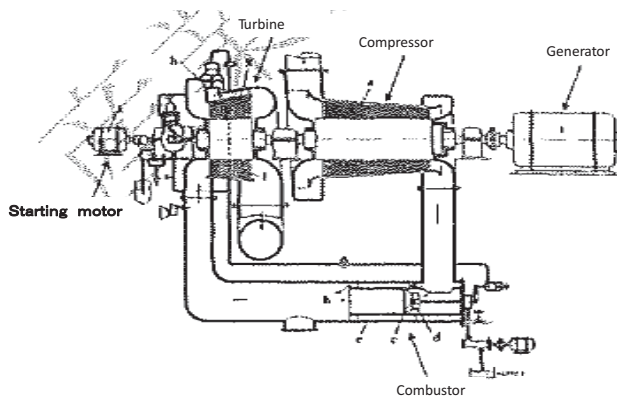


Fig. 6 The world first gas turbine developed by BBC

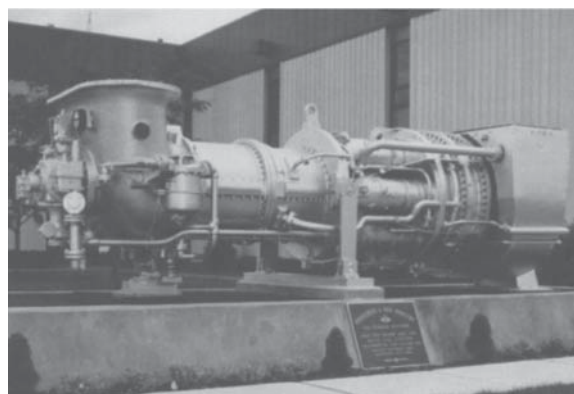


Fig. 7 The first MS 3000 gas turbine developed by GE

市場ではこの高温ガスタービンと組み合わせたコンバインドサイクルが導入されつつあった。この時、BBCとはガスタービンの技術提携の更新時期を迎えていた。社内で検討した結果、技術提携先をBBCからGEに変更

することが決定され、筆者を含む関係者がガスタービンを製造しているサウスカロライナ州のグリービル工場、本社のあるニューヨーク州のスケネクタディ工場、蒸気タービンを製造しているボストンのリン工場を視察した。これに基づき1982年、GEとの間でガスタービンの技術提携契約が締結された。GEとの契約はMA契約（共同製造）と言われ回転体を含む動静翼、燃焼器等の高温部品はGEが製造し、それ以外は提携した企業が製作することになっている。これにより受注活動を開始したが、技術提携先を変更しただけで受注出来るほど国内ユーザは甘くない。初号機を受注するまでには幾多の課題を克服する必要があった。

2) コンバインドサイクル製造設備の拡充とコンバインドサイクル技術の確立

GEのMA契約ではガスタービンを出荷する前に必ず、定格回転まで回転数を上昇させ無負荷試験を実施することになっている。このため、ガスタービンを定格回転まで上昇させ無負荷運転可能な試運転設備を構築した。次にガスタービンの排熱を回収し、蒸気を発生させる排熱回収蒸気発生装置の専用の製造工場を構築した。パネルの製造を自動化し組み立てるため大きな工場が必要であり大がかりな投資が必要であった。しかし、製造設備を整えるだけでは不十分であった。GEとのMA契約では動静翼を含む回転体、燃焼器はGE所掌であるが、この部分の技術も習得する必要があった。このため、まず、独自技術で1100℃ガスタービンのスケールモデルを製作した。このガスタービンは燃焼器を開発するための圧縮空気を供給する圧縮機駆動用ガスタービンとして使用された。次に1300℃ガスタービンについても独自技術でスケールモデルを開発・製作した。このガスタービンはその後、自家発電装置として使用された。コンバインドサイクルはガスタービンと蒸気タービンを組み合わせたシステム技術である。

この技術を強化するためにコンバインドサイクル技術部が設立され、筆者が初代技術部長を拝命した。当時、我が国で採用されていたコンバインドサイクルはガスタービン、蒸気タービン、発電機を1軸に連結した一軸型が主流であった。1300℃ガスタービンを適用した場合は蒸気タービンは高・中圧一体型タービンと複流の低圧タービンを組み合わせた2車室型が主流であった。先行する他社と差別化を図るため、高圧・中圧・低圧を1本の軸で構成し最終段に長翼を使用した1車室型タービンを開発する必要があった。このためには、高温から低温まで使用可能なロータの開発が必要であった。この開発は、材料開発部門が主体となり傾斜熱処理を採用した新しいロータ材を開発した。また、最終段の長翼には既の実績のある翼長40インチのチタン翼を適用した。これにより非常にコンパクトな発電所の構築が可能となった（図8）。

このような活動が評価され、中部電力㈱から初めて主

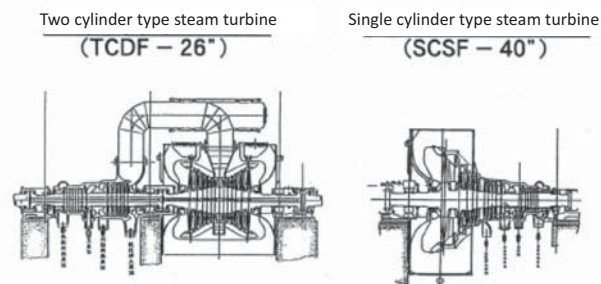


Fig. 8 Comparison of the turbine cylinder arrangement between single cylinder and two cylinders

契約で60HZの一軸型コンバインドサイクルを受注した。燃焼器もユーザの意向で独自開発の燃焼器が採用された。これに続き東京電力㈱からも50HZの一軸型コンバインドサイクルを受注した。その後、GEが供給する1300℃級ガスタービンのディスク接続部分の初期トラブルに悩まされたが、現在ではこの問題は完全に解決している（図9）。

技術提携先の変更が受注活動で如何に困難を伴うか身を持って経験した。

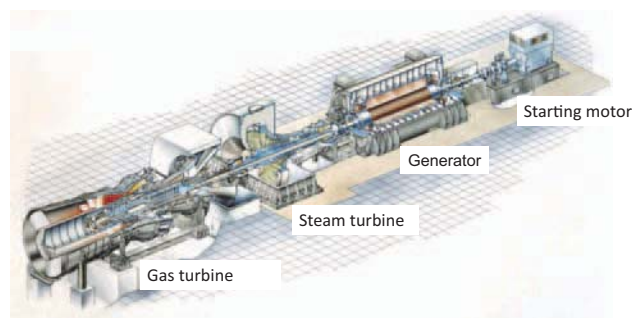


Fig. 9 1300℃ class single shaft power train

5. マイクロコンバインドサイクル実験設備の開発導入と運転経験

産業界での様々な経験を経た後、2004年、東北大学大学院工学研究科に奉職する機会を得た。2004年は大学が独立法人化し大学も民間から教員を受け入れ産業界の要望に応える学生を育成しようと言う機運が高まっていた。

産業界の経験を生かした実践的な教育をする必要があると判断し、研究室に超小型のマイクロコンバインドサイクル実験装置を導入することを決定した。

5.1 マイクロコンバインドサイクル実験設備の開発導入

大学の研究室に設置するためには制約が大きいことから下記の点に配慮した。

- 1) 建設費は極力抑える。
- 2) 許認可申請は不要とする。
- 3) 運転は資格を持たない学生が運転・実験出来る。

以上を考慮しガスタービンはガスジェネレータとパ

ワータービンの2軸式とした。

建設費を抑制するためガスジェネレータは13万回転、パワータービンは8万回転の高速回転とし小型化した。

パワータービンは減速機と駆動ベルトにより減速し、3000rpm,10kVAの3相同期発電機を駆動した。発電した電力はサイリスタを介して電気抵抗器で消費した（図10）。

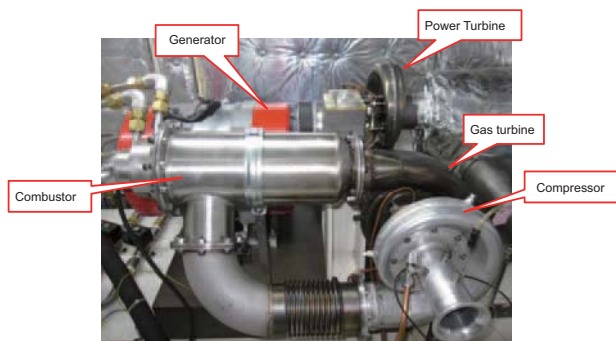


Fig.10 The micro gas turbine test device

ガスタービンの排熱は後流に設置した排熱回収ボイラで回収した。建設費を抑制するため排熱回収ボイラはクリーニング屋で使用しているボイラのバーナ部分を取り外し、その部分からガスタービン排気を導入した。このような対応により排熱回収ボイラの伝熱面積は5m²以下となり許認可申請と運転資格が不要となり学生自身が運転出来るようになった。発生した蒸気は電気式過熱器により300℃の過熱蒸気として蒸気タービンへ導入した。蒸気タービンは直結した圧縮機を駆動するシステムとした。

蒸気タービンと圧縮機には軽自動車用の過給器を適用した。圧縮機の動力は圧縮比、温度、空気量、回転数、圧縮機特性曲線より算出した。

排熱回収ボイラの排気系にはボイラの圧損の相殺とガスタービンの吸い込み空気量の制御のため、インバータによる回転数制御が可能な誘引通風機を設置した。また、

ガスタービンが停止しても蒸気タービンの単独運転が可能なダクトバーナを設置した。

さらに、ガスタービンの夏場高温時の出力低下特性を改善するため、ガスタービンの吸気系に水噴霧装置を設置しその効果を確認した（図11）。

5.2 実験装置の試運転中のトラブル

本実験設備は小型、高速、高温のガスタービンのため、試運転段階で様々なトラブルを経験した。初期段階では燃焼調整に苦労した。燃料が少ないと失火、多すぎると過燃焼となる。幸い、排熱回収ボイラの排気に誘引通風機が設置されているため、誘引通風機の回転数制御を行い最適点を見出した。軸受にはセラミックボールベアリングを採用しているが、軸受けの損傷トラブルも経験した。また、回転数の減速には減速機に加えベルトも使用しているが、駆動ベルトの損傷も経験した。最も苦労したのは3相交流発電機と抵抗器との結線であった。発電機と抵抗器の間にはサイリスタを介在させ、スムーズな負荷制御を行う計画であった。当初、分周制御方式を採用したが負荷制御が上手く行かず、インペラーと静止部の接触が発生した。ガスタービンを解放し、接触部をヤスリで削り取りクリアランスを確保した。その後、位相制御方式に変更しスムーズな負荷上昇が可能となりこの問題は解決した。これらのトラブルは試行錯誤を繰り返しながら学生自身が解決した。この間、学生が逞しく成長していく姿に感銘を覚えた（図12）。

5.3 実験結果

本実験装置によりコンバインドサイクルのシステム出力が20%増加することを確認した。これは実機に比べると少ないが、実験装置で蒸気タービンが背圧タービンであることを考慮すると妥当な数値であると判断された。また、水噴霧による吸気温度の低下は4℃であった。相対湿度は40%から88%に増加したことを確認した。

ASPENのソフトを使い4℃の温度補正をした結果、出力増加は5%であった。これは大型ガスタービンに設置されている水噴霧装置の実績とほぼ同レベルである

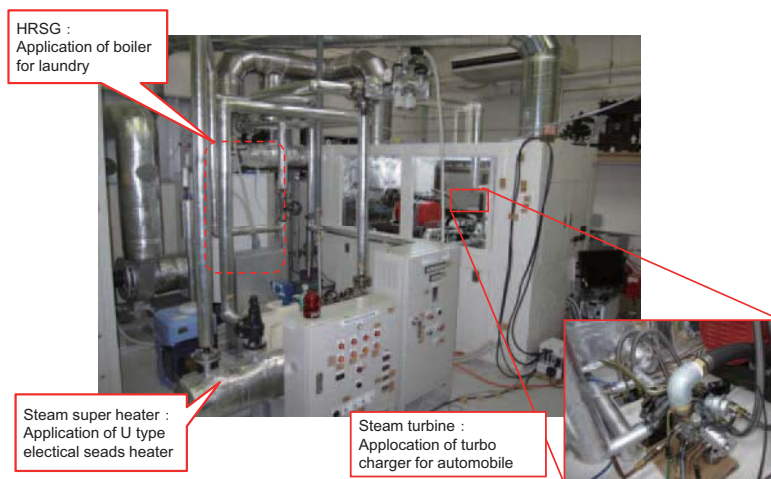
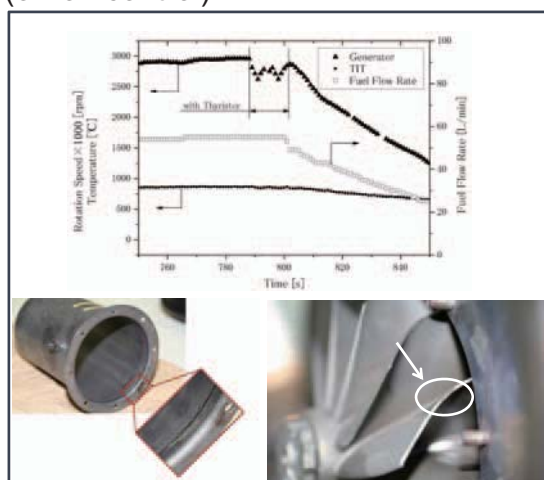


Fig.11 The micro combined cycle test device

Thyristor controlled power conditioner (on-off control)



Abnormal sound from power turbine
just after application of load



Difficulty of load control
by on-off control method

Fig.12 Example of rubbing trouble under test operation

ことを確認した。燃焼器には渦流式の低 NO_x 燃焼器を採用したが、 NO_x は10ppm以下と低かった。燃焼温度が 950°C 程度であることを考えると妥当な数値と判断された。

6. おわりに

以上、ターボ機械の初号機を開発する過程で発生した様々なトラブルについて先人達の経験も含めて紹介した。現在のターボ機械は先人達が苦労した経験の集積の上に成り立っていることをご理解頂けたものと思う。ガスタービンは内燃機関であるため外燃機関の火力発電に比べ出力密度が高く、まだまだ、進化の過程にある。今後、更に発展して行くものと思われ、今後の若手技術者の活躍に期待したい。

本稿が今後、ターボ機械の分野を志す若手技術者の参考になれば幸いである。

引用文献

- (1) 大地昭生, 電力技術の継承, 電気評論10月号, Vol. 100, No. 10 (2015), pp. 40-52.
- (2) 大地昭生, 火力発電プラント設備の概要と運用 (1), 火力発電, 配管技術4月号, Vol. 58, No. 5 (2016), pp. 12-19.
- (3) 大地昭生, 火力発電プラント設備の概要と運用 (2), コンバインドサイクル発電, 配管技術5月号, Vol. 58, No. 6 (2016), pp. 7-15.
- (4) 大地昭生, 大学における実践的工学教育について, 火力原子力発電8月号, Vol. 65, No. 8 (2014), pp. 18-23.
- (5) 田沼唯士, 大地昭生, 蒸気タービン, ターボ機械協会, (2013), pp. 2-17.

特集：大型プロジェクトに学ぶ：航空機エンジン及び発電タービン技術・産業の将来への提言

WE-NETガスタービン研究開発と高温・高性能ガスタービンに向けた成果の展開

A Review of the Research and Development of the WE-NET Hydrogen-oxygen Combustion Turbine for Development of its Outcome toward Higher-temperature/ Higher-efficient Gas Turbines



田沼 唯士^{*1} 新関 良樹^{*2}
TANUMA Tadashi NIIZEKI Yoshiki

キーワード：水素燃焼タービン，1700℃ガスタービン，冷却翼，水素燃焼風洞テスト

Hydrogen-oxygen Combustion Turbine, 1700 Degree C Gas Turbine, Cooling Blade,
Hydrogen-oxygen Combustion Wind Tunnel Test

1. はじめに

世界の人類活動などに起因する二酸化炭素排出量の約4割は発電により発生していると報告されている⁽¹⁾。一方，世界の発電量のおよそ8割は蒸気タービンとガスタービンを原動機とする発電所で作られている⁽²⁾。これらのタービンの燃料は，石炭，天然ガス，原子力，重油，地熱，バイオマスなど多岐に渡っている。水力や風力等の再生可能エネルギーを利用して発電した電力で水素を製造し，日本のように再生可能エネルギー源に恵まれない電力多消費地域に再生可能エネルギーで製造した水素を輸送し，石炭，重油，天然ガス等の二酸化炭素を発生する燃料の代わりに水素酸素燃焼タービンで発電すると言う壮大な国家プロジェクト「水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術（WE-NET）研究開発・第I期」が1993年から1998年に実施された⁽³⁾⁻⁽⁶⁾。この国家プロジェクトは，先行したムーンライト計画などと違って研究組合を設置せずに既存の公益法人が受け皿になって進める体制としたため，大枠の体制表では国内タービンメーカーの参画が読み取れないが，WE-NET研究開発・第I期の中心であった水素酸素燃焼タービンの調査研究と要素技術開発は国内の多数のタービンメーカーに再委託され，タービンメーカー各社にて実施された⁽⁷⁾⁻⁽¹⁵⁾。

筆者の一人はこの水素燃焼タービンの空力設計の一部を担当し，実用化されつつあったCFD（Computational Fluid Dynamics）を使用して，当時開発中の最新の性能向上技術を盛り込んで設計した記憶がある。第I期終了後の国家プロジェクトの方向転換により水素燃焼タービンは実機製造に至らなかったが，このプロジェクトの

過程でタービン設計技術の向上，解析技術の向上等の成果があり，ガスタービンや蒸気タービンの技術力向上という波及効果をもたらしたと考えている。本稿執筆にあたり，WE-NET水素燃焼タービンの開発を担当した複数のメーカーの当時の担当技術者や開発指導者に話をうかがった。水素燃焼タービンの研究開発の経過と成果，そしてその後の各社の現在に至る製品開発や技術開発に及ぼした効果を考察する。

2. WE-NETプロジェクト第I期の概要

サンシャイン計画・ムーンライト計画の後を受けて1993年に開始された通商産業省工業技術院のニューサンシャイン計画の中で新エネルギー・産業技術総合開発機構が実施したWE-NET計画は，世界各地に存在する再生可能エネルギーを利用して，水の電気分解等から水素を製造し，これを液化等によって輸送可能な媒体に変換して消費地に輸送して利用する，といった水素製造・輸送・利用全体の地球規模でのネットワーク構築を目指した壮大な計画であった。特に1993年から1998年まで実施されたWE-NETプロジェクト第I期⁽³⁾⁻⁽¹⁵⁾では，発電用水素酸素燃焼タービンを開発の中心に据えて，全体システム，水素製造技術，水素輸送・貯蔵技術，水素利用技術，革新的・先導的技術の研究開発が6年間の研究開発予算総額約100億円で実施された。この国家プロジェクトでは，先行したムーンライト計画などと違って研究組合を設置せずに既存の公益法人が受け皿になって進める体制が構築された。プロジェクトの実施に当たっては分野別に9つのサブタスクに分けて表1に示す機関に委託された。プロジェクト全体の調整と方向性を検討するためにサブタスク1（総合評価と開発計画のための調査・研究）が設けられて（財）エネルギー総合工学研究所に委託された。サブタスク3（全体システム概念設計）は再生可能エネルギー利用発電設備，水素製造設備，輸送媒体製

原稿受付 2016年9月24日

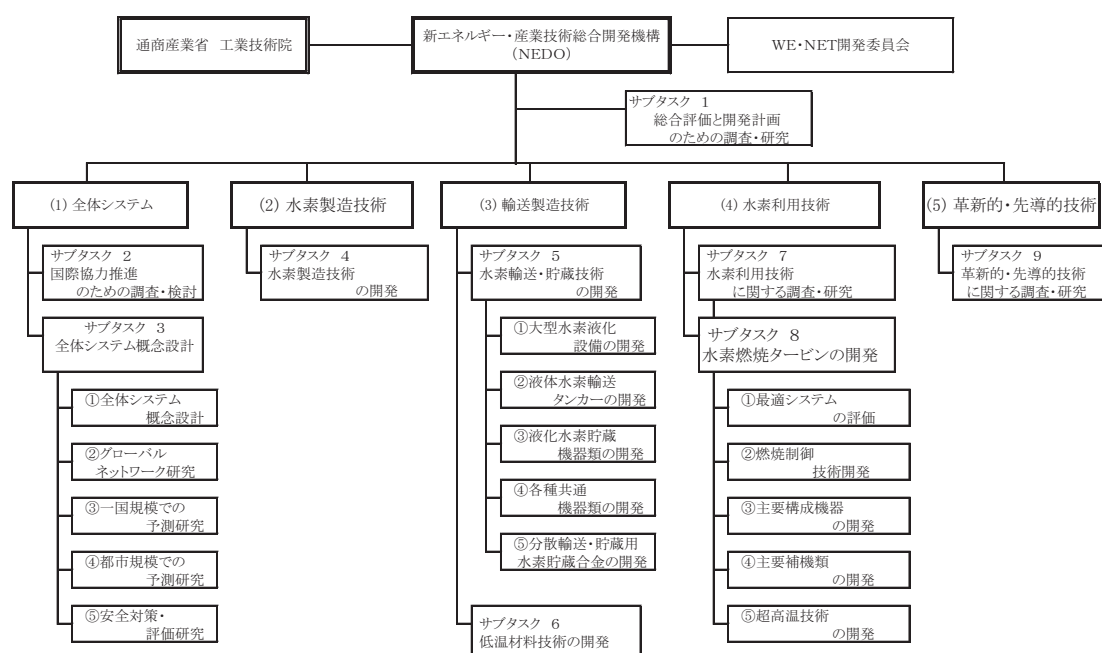
*1 帝京大学 ジョイントプログラムセンター
応用流体力学・エネルギー機械系

〒173-8605 板橋区加賀 2-11-1

*2 (株)東芝 エネルギーシステムソリューション社

Table 1 WE-NET Subtasks and assignment⁽³⁾⁻⁽⁵⁾

Category	Subtasks	Assignment
全体システム	1. 総合評価と開発計画のための調査・研究	(財)エネルギー総合工学研究所
	2. 国際協力推進のための調査・検討	(財)エンジニアリング振興協会
	3. 全体システム概念設計	電源開発株式会社, (財)電力中央研究所ロンドンリサーチ/インベリアルカレッジ, (財)エネルギー総合工学研究所
水素製造技術	4. 水素製造技術の開発	(財)エンジニアリング振興協会
水素輸送貯蔵技術	5. 水素輸送・貯蔵技術の開発	(財)エンジニアリング振興協会
	6. 低温材料技術の開発	(財)金属系材料研究開発センター
水素利用技術	7. 水素利用技術に関する調査・研究	(財)エンジニアリング振興協会
	8. 水素燃焼タービンの開発	(財)電力中央研究所 (財)発電設備技術検査協会
革新的・先導的技術	9. 革新的・先導的技術に関する調査・研究	(財)エネルギー総合工学研究所

Fig. 1 The Organization and subtask themes of the research and development plan for the World Energy Network (WE-NET) national program⁽⁷⁾

造設備、貯蔵設備、輸送設備、水素燃焼タービンから構成される全体システムの概念設計を行った。水素燃焼タービンの開発（サブタスク 8）は(財)電力中央研究所と(財)発電設備技術検査協会に委託され、電力中央研究所は水素燃焼タービン最適システムの評価、燃焼制御技術開発、超高温材料の開発を担当し、発電設備技術検査協会はタービン翼、ロータ等主要構成機器の開発、高温熱交換器、液体水素の冷熱を利用した酸素製造プロセス等主要補機類の開発を担当した。サブタスク 8 は前述した項目について水素燃焼タービン開発に必要な調査、要素開発等を行い、パイロットプラント開発のために必要な技術を確認することが目的であった。

WE-NETプロジェクト第 I 期では、水素燃焼タービンの主要機器である燃焼器とタービン初段静動翼の冷却翼モデルを製作して、実機圧力での水素－酸素燃焼によ

る燃焼試験と初段静動翼列冷却試験を実施して、良好な結果を得た。プロジェクト評価委員会による技術評価⁽¹⁵⁾では、次のステップのパイロットプラント開発に進むための技術の見通しを付けたと評価されたが、プロジェクト第 1 期後半でプロジェクトを巡る情勢が変化して、大規模な水素利用発電システムを実現する社会環境が整うにはまだ時間を要するとの理由で、水素燃焼タービンの開発は打ち切りとなった⁽⁴⁾⁽⁶⁾。

3. 水素燃焼タービン最適システムの評価

公益機関に委託されたサブタスクは、更に詳細な研究開発項目に展開されて、主に国内タービンメーカー等に再委託された。図 1 に各サブタスクの詳細な研究開発項目を示す⁽⁷⁾。この中で、水素燃焼タービン最適システムの評価は株式会社東芝、三菱重工業株式会社、ウエスチ

ングハウス社の3社に再委託された。高位発熱量基準発電端効率60%以上とした開発目標を達成できるシステムが検討され、トッピング再生サイクル、新ランキンサイクル及び再熱再生ランキンサイクルの3システムに絞り込まれ、500MW級発電システムの概念設計が実施され、トッピング再生サイクルが選定された。500MW級発電システムの設計効率は目標性能を上回り、61.8%となった。この方式はランキンサイクルには不要な低圧及び高圧圧縮機(LC, HC)が必要であるが、高温高圧タービン(HHT)の流量が多く、翼長を長くすることができて空力設計上有利であり、冷却翼の加工がしやすいことなどが評価されたと言われている。

選定されたトッピング再生サイクルを図2(文献⁽⁷⁾⁽⁹⁾⁽¹²⁾を参考に作成)に示す。ガスタービンで用いられるブレイトンサイクルと蒸気タービンの基本サイクルであるランキンサイクルを組み合わせたサイクルになっており、オーストリアGraz大学のJericha教授が提案したシステムを用いている。高圧圧縮機(HC)から供給される水蒸気は再生熱交換器で加熱されて4.75MPa、716℃で燃焼器に入る。ここに水素と酸素が当量比で供給されて水蒸気中で燃焼して、1700℃になるように温度調整されて高温高圧タービン(HHT)、高温低圧タービン(HLT)で膨張して出力を発生する。HLTの排気蒸気はHC吐出蒸気の加熱と低圧タービン(LT)凝縮水の蒸発とスーパーヒートに必要な熱を熱交換器で供給して0.10MPa、105℃の飽和に近い水蒸気となって低圧圧縮機(LC)に供給される。この様にブレイトンサイクルはクローズドサイクルになっている⁽⁹⁾。

低圧タービン(LT)の凝縮水は復水ポンプ、再生熱交換器(低圧ヒーター)、脱気器、給水ポンプを経由して加熱、脱気、昇圧されてHLT排気の熱で蒸発、スーパーヒートされて高圧タービン(HT)に供給される。HT排気の一部は燃焼器へ、残りはHHT、HLTの冷却蒸気として使用される。一方、HLT排気の一部は蒸気発生器とエコノマイザーの間で分岐してLTに供給される。

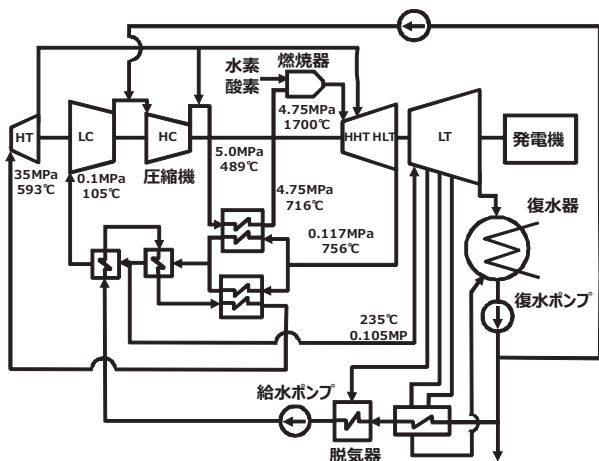


Fig. 2 Topping regeneration cycle diagram for the study of optimum system evaluations⁽⁷⁾

こうして、HTとLTの間がブレイトンサイクルと重複する形でランキンサイクル(ボトムリングサイクル)が形成されている。

各タービンの出力は、HHTとHLTから537MWの出力、HTから34MW、LTから63MWの出力があり、LCで29MW、HCで100MWが消費され、発電機損失を考慮すると発電機端出力は500MWとなる⁽¹²⁾。別系統で昇圧された酸素燃料を燃焼器に供給していることと、給水ポンプで圧力上昇して蒸気発生器、HT等を経た高圧蒸気の一部が燃焼器に供給されていること等の理由により通常のガスタービンと比較して圧縮機で消費される動力のタービン出力に対する割合が非常に小さくなっている。

4. 燃焼制御技術の開発

選定されたトッピング再生サイクルの実現には水素・酸素燃焼器、高温タービンや高温熱交換器などの開発が重要となる。燃焼制御技術の開発は石川島播磨重工業株式会社(現在は株式会社IHI)、三菱重工業株式会社及び株式会社日立製作所に再委託された。燃焼反応性の高い水素・酸素燃焼をガスタービン燃焼器に適用するためには、蒸気で燃焼ガスを希釈してタービン入口温度1700℃に制御できること、水素と酸素の割合を完全燃焼するのに必要な分だけ供給して燃焼させる制御ができることが必要となる。こうした課題を解決するために、小型モデルバーナーによる保安技術などの基礎検討を経て、3種類の燃焼器の部分スケールモデルを用いた、加圧条件下での水素・酸素燃焼試験を実施した。その結果、パターンファクターが3種類の中で最も小さく、初段タービン翼に均一に燃焼ガスを供給できる利点があるアニュラー(環状流路)型燃焼器が採用された⁽⁵⁾⁽¹⁴⁾。この燃焼器はバーナ部で酸素を水蒸気と混合した後、水素と燃焼させる酸素希釈燃焼方式を採用している。

5. タービン翼・ロータ冷却技術の開発

水素燃焼タービンの主要構成機器の開発の内、タービン翼冷却技術の開発は、当初は4社によりそれぞれ独自の冷却方式についての競争開発方式で開始されたが、1996年度に行われた中間技術評価の結果を受けて、1997年度からは三菱重工業株式会社、株式会社東芝、株式会社日立製作所の3社で継続することになった⁽⁷⁾。

タービン翼冷却構造は、前述の最適システムの検討で選定された500MWのトッピング再生サイクルの水素燃焼タービンの設計条件である、タービン入口温度1700℃、入口圧力4.75MPaにて設計された。3社がそれぞれ開発した翼冷却方式は次の通りだった。

- 1) 蒸気回収・フィルム冷却ハイブリッド方式(東芝)
- 2) 静翼水冷却動翼蒸気回収(局所フィルム冷却)方式(日立製作所)
- 3) 完全蒸気冷却方式(三菱重工業)

蒸気回収・フィルム冷却ハイブリッド方式(東芝)で

は、静翼と動翼の主要な冷却は蒸気回収方式として、熱負荷が高く内部冷却だけでは表面温度を十分に下げられない初段前縁や後縁近くでフィルム冷却を併用した。図3に静翼冷却構造、図4に動翼冷却構造を示す。翼基材には、静翼、動翼とも、Ni基超合金単結晶材CMSX4を採用している。遮熱コーティング（Thermal Barrier Coating: TBC）は静翼、動翼ともに、トップコートに $\text{ZrO}_2\text{-}8\%\text{Y}_2\text{O}_3$ を、ボンドコートにNiCo-CrAlYを採用した。

静翼水冷動翼蒸気回収（局所フィルム冷却）方式（日立製作所）では、タービン初段静翼に壁面・翼一体型クロズド水冷却方式を採用した。図5に静翼の冷却構造を示す。初段動翼は、主要な冷却は蒸気回収方式として、熱負荷が高い前縁のみ少量のフィルム冷却を採用した。図6に動翼の冷却構造を示す。翼基材には、静翼は銅合金CZ-Cuを選定し、動翼には、Ni基超合金単結晶材YH61を採用した。静翼、動翼とも前述とほぼ同様の遮熱コーティングを施工した。

完全蒸気冷却方式（三菱重工業）では、静動翼ともにフィルム冷却を全く用いない完全蒸気回収方式を用いた。図7に静翼の冷却構造を示す。静翼部にはタービュレーターを用いたサーペンタイン冷却通路、シュラウド部はインピンジ冷却を用いた。図8に動翼の冷却構造を示す。冷却試験用の翼基材には、静翼と動翼ともにコバルト基超合金X-45を選定し、遮熱コーティングは、トップコートに $\text{ZrO}_2\text{-}8\%\text{Y}_2\text{O}_3$ を、ボンドコートにCoNi-CrAlYを採用した。

3社で開発された冷却翼は静翼と動翼それぞれについて、約1/2スケールの冷却試験翼を作成し、秋田県田代

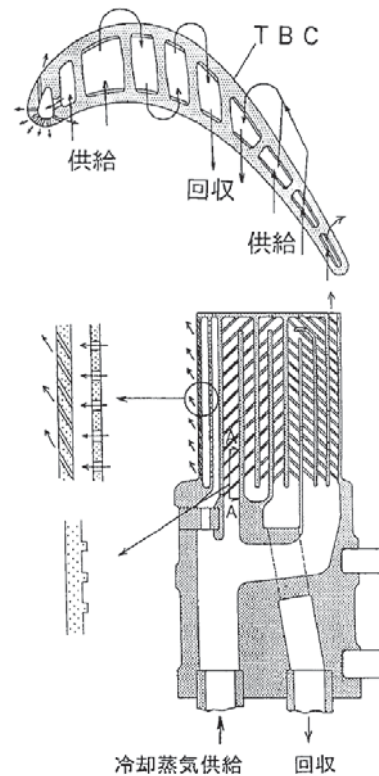


Fig. 4 Cooling structure of the rotor blades (closed steam cooling /local film cooling, Toshiba)¹²⁾

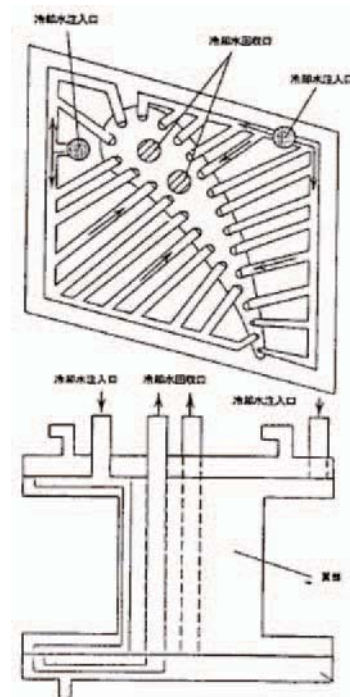


Fig. 5 Cooling structure of the stator blades (closed water cooling, Hitachi)¹²⁾

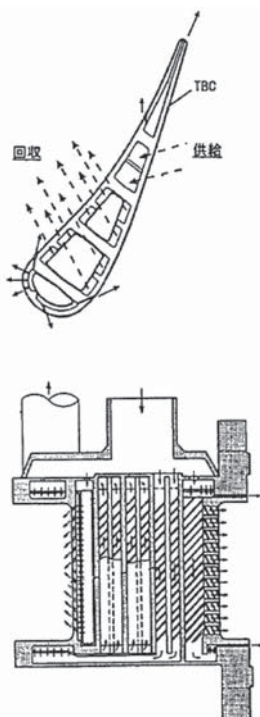


Fig. 3 Cooling structure of the stator blades (closed steam cooling /local film cooling, Toshiba)¹²⁾

町の三菱重工ロケットエンジン燃焼試験場にて、水蒸気中で水素・酸素燃焼させた作動媒体を用いる実温度翼列風洞を用いた評価試験が実施された。計測時間に若干の差があるものの、各方式とも水素・酸素燃焼による1700℃における計測に成功した。また、短時間ではある

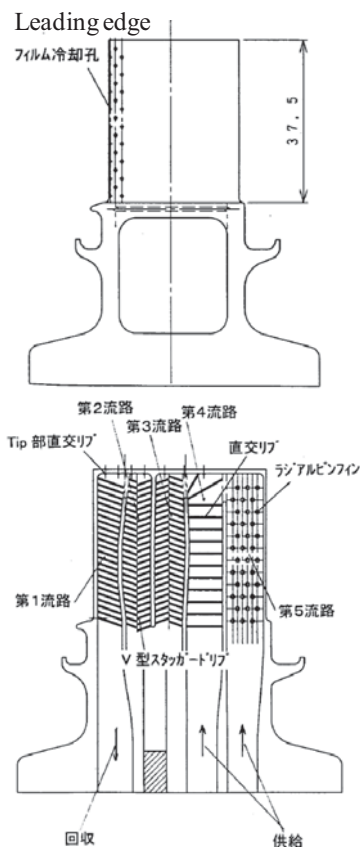


Fig. 6 Cooling structure of the rotor blades (closed steam cooling /local film cooling, Hitachi)¹²⁾

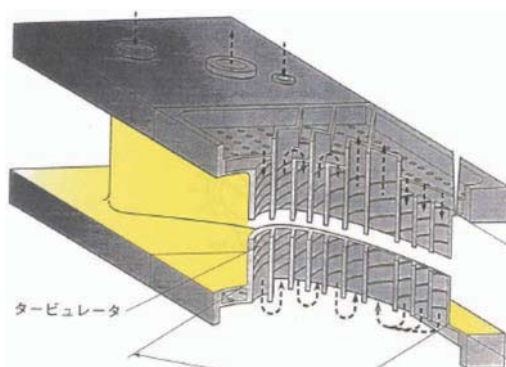


Fig. 7 Cooling structure of the stator blades (Full closed steam cooling, MHI)¹²⁾

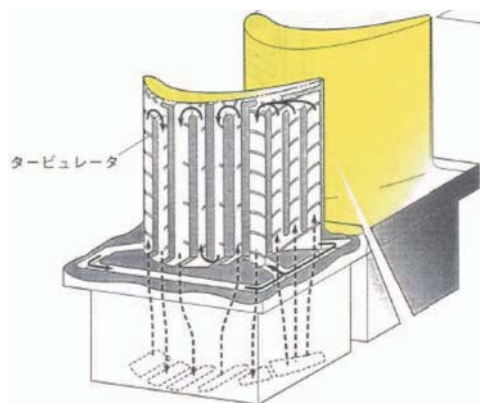


Fig. 8 Cooling structure of the rotor blades (Full closed steam cooling, MHI)¹²⁾

が、TBCの健全性を確認することができた。試験結果を用いた再計算により、目標としたプラント効率60%以上の達成を各方式とも立証した。主要構成機器開発部会による各方式の評価が僅差となったことから、当時の開発段階を考慮すれば3社とも今後開発努力を継続することが望ましいとされた⁽⁷⁾⁽¹⁴⁾。

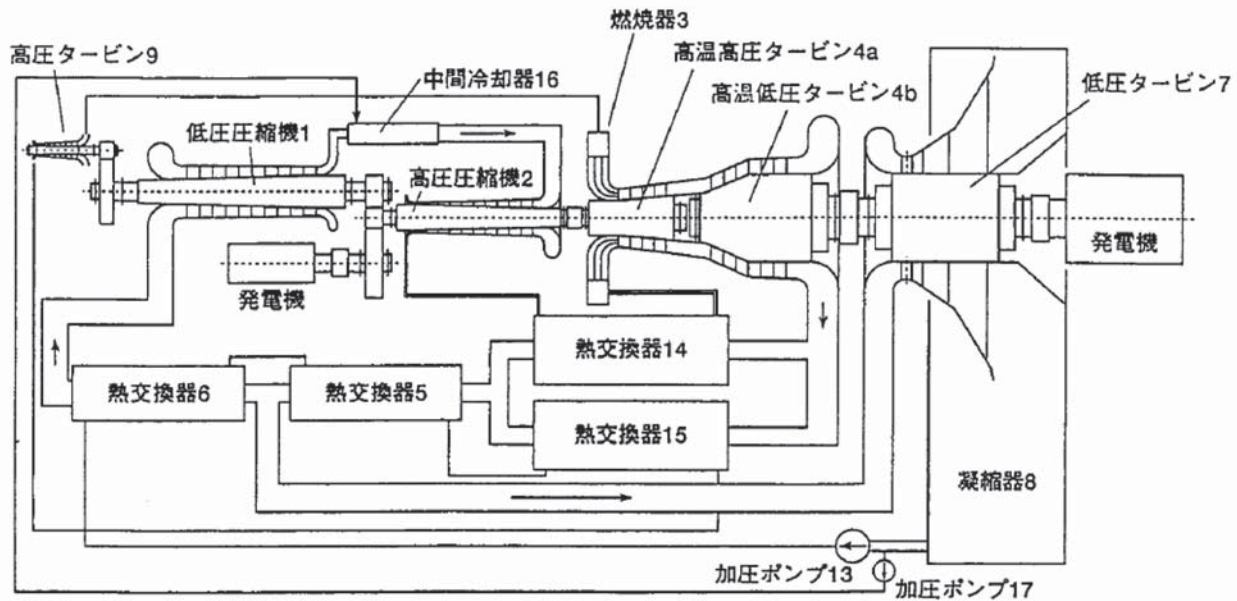
ロータ冷却技術の開発は三菱重工業株式会社と川崎重工業株式会社に再委託され、パイロットプラント向けの高圧タービンの概念設計と基本設計が実施された。水素燃焼タービンの構成案を図9に示す。高温高圧タービンについてはロータディスクの冷却設計が実施された。今後の開発課題として、ロータ構造の詳細な応力評価を進め、詳細形状を決定すること、シール構造の開発を更に進めて、一層の性能向上を図ること、高温・高圧条件下での試験データによる予測精度の検証、数値解析技術の向上等の必要性が抽出された。

6. WE-NETプロジェクト成果の「二酸化炭素回収対応クローズド型高効率ガスタービン」への展開

前節までに述べたように、水素燃焼タービンの開発は技術的には順調に進展していたが、水素エネルギーの利用推進に関わる情勢の変化を受けて、WE-NETでの水素燃焼タービン開発はI期のみで打ち切りとなった。代わって計画されたのが「二酸化炭素回収対応クローズド型高効率ガスタービン」開発である。WE-NETで検討されたトッピング再生サイクルそのものは有望であると判断され、メタン（天然ガス）焚きとしてその成果を早期に実現することを目指すとともに、要素技術としての高効率・高温ガスタービンの開発促進を狙ったものと理解される。本プロジェクトは、WE-NETを継承するプロジェクトでありながら水素焚きでは無くなったため、発電システムに限定した別のプロジェクトとして1999年に再発進した。このプロジェクトではWE-NETと同様に、発電端効率60%以上（HHV、1700℃級、酸素製造動力を除く）達成を目標とし、500MWプラント概念設計に必要な開発項目を電中研、三菱重工、東芝、日立製作所、石川島播磨重工が分担して、主要項目は複数組織が担当する体制で開発を進めた。

開発の基本となった二酸化炭素回収対応クローズ型ガスタービンサイクルを図10に示す。水素燃料がメタンとなったため、システムの作動媒体はWE-NETが水蒸気であったのに対してCO₂が加わっており、これを復水器で分離回収するシステムとなっている。

本プロジェクトではセラミック製遮熱コーティング（TBC）技術や冷却技術、CMC（Ceramic Matrix Composites）を含む高温材料技術やシステム技術など次世代ガスタービンに直接につながる技術がWE-NETに続いて開発されることになり、5年計画で開始された。しかしながら、今回も実証プラントの具体化を前に3年目の年に中断されてしまった。当時のエネルギー情勢が

Fig. 9 Preliminary layout plan of the hydrogen combustion turbine¹²⁾

ら分散システムが志向されたこと、政策転換や省庁再編なども背景にあるものと推定される。

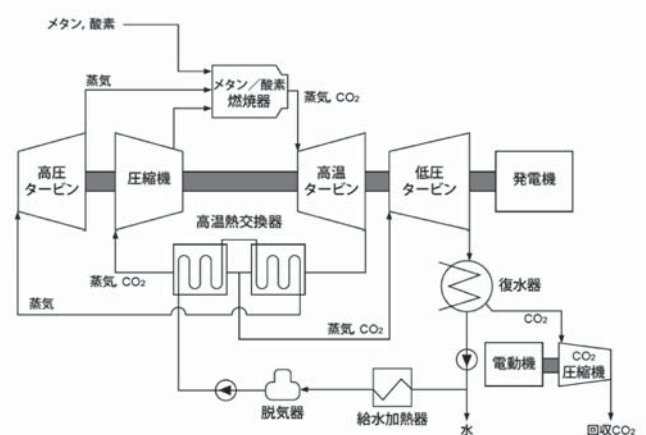
結果として、本システムが実現されることは無かった。ガスタービンの要素技術等においては、特に高温化等では着実な進展が得られたが、一方で、復水器で分離されたCO₂を回収するための膨大な圧縮動力の問題や高温熱交換器などガスタービン主機以外の技術課題が多く、プラント実現へのハードルは高かったと思われる。その意味で、これらのプロジェクトは時代からやや先行したものであったかもしれない。しかしながら、これらのプロジェクトを通じて開発された技術は1700℃級ガスタービンの実現や現在進められている閉サイクルIGCCシステムなどにつながるものであり、1300℃～1500℃級のガスタービンが現実のものとなり次のステップへ踏み出すタイミングで、ガスタービン関連の唯一の国家プロジェクトとしてWE-NETおよび本プロジェクトが実施された意義は大きく、将来の夢を身近に手繰り寄せるためには必要なプロセスであったと思われる。

「二酸化炭素回収対応クローズド型高効率ガスタービン」プロジェクトの事後評価では、本プロジェクトが成功したとはいえないながらも、成果の応用・波及に期待するとともに、本プロジェクトが国際的に見ても極めて野心的なプロジェクトであって今後その実用化に向けて、集約された研究が継続され、各要素それぞれの検証試験、システム実証試験が再開され実用機の建設に着手されることを近未来に期待したいとコメントされたとのことである。

7. WE-NETプロジェクト成果の「1700℃級超高温ガスタービンの実用化技術開発」プロジェクト等への展開

前述した通り、WE-NETプロジェクトでの水素燃焼

タービンの開発は第I期6年間の後に1999年で中断となり、後続の「二酸化炭素回収対応クローズド型高効率ガスタービン」開発は3年目の2001年度で中断となった。水素エネルギーの大容量発電における利用や天然ガス燃料でもクローズドサイクルで燃焼させて、二酸化炭素を回収するゼロエミッション発電の開発はその後も再開されることはなく、現在に至っている。一方、天然ガス燃料等の発電用コンバインドサイクルにおけるガスタービンの高温化は着々と進展している。2008年から2011年にはガスタービンコンバインド発電効率向上を目的とした「1700℃級超高温ガスタービンの実用化技術開発」の国家プロジェクトが経産省、文科省、物材機構、三菱重工及び複数の大学が参加する体制で実施された。WE-NET水素燃焼タービン開発に参加したガスタービン開発技術者の一人は、「WE-NETの高温タービンスペックなどが、その後の通常のガスタービンの高温化等にそのまま使用されたわけではないが、WE-NETの検討を通

Fig. 10 Conceptual diagram of the carbon dioxide recovery gas turbine closed system¹⁶⁾

じて1700℃級の技術難易度のレベルを定量的に把握することができた」と評価している。更に、「CO₂回収プロジェクトの検討も踏まえ、これらの経験をベースに、まずはガスタービンコンバインドサイクル（GTCC）の基本的な仕様に対して、具体的な技術課題を全方位で抽出し、研究しているのが1700℃級ガスタービンのプロジェクトであり、この中で技術完成度が高いものをJ型ガスタービン（三菱重工製1600℃級ガスタービンシリーズ）に反映することができた。そういう意味では、先行するこのようなプロジェクトで計算や解析（一部は要素試験）を通じて、各技術分野の技術者が難易度のイメージをより明確につかみ、難しいが達成可能な目標を設定できたことが、次の世代の新型ガスタービンの玉成に結び付いたと考えている」とコメントしている。

8. WE-NET及び二酸化炭素回収対応クローズド型高効率ガスタービンプロジェクトに関する所感

WE-NET水素燃焼タービン開発の最大の成果は実際に水素酸素燃焼で1700℃に制御された蒸気を用いた初段静翼と初段動翼の冷却翼評価試験を実施して、開発翼が1700℃の条件に耐えうる見通しを得たことである。雪が降る冬季の実験場で試験を実施した技術者は、試験の成功に際して、「1700℃ガスタービンの展望が見えたように感じた」と回想している。この試験は水素酸素燃焼を行うので、三菱重工のロケットエンジンの燃焼試験が行われる秋田の田代試験場で実施された。ガスタービン技術者は水素燃焼に慣れていないので、三菱重工名古屋工場のロケットエンジン試験の担当者が、この試験の支援のために参加したとのことである。プロジェクトの再委託元の電力中央研究所が自らこの試験の準備と試験中の現場のマネジメントを担ったことで、プロジェクトの効率的な推進がなされ、タービン翼と燃焼器の試験を成功裡に無事完了できたとの参加企業側の声があった。

WE-NETプロジェクトの当初の方針は、水素燃焼タービンによる1000MW級（500MW機2台）の発電プラントを実現させることであった。第I期の期間中にこの方針が大きく変わったことは残念なことだったが、1000MW級の発電所を継続して運転することが可能な水素を継続的に水車や風車などの自然エネルギーから製造し、輸送し、貯蔵することは現時点で考えても、非常に高いハードルである。中断はやむ負えなかったと思える。

一方、ほぼ同じ時期に米国では約800億円規模と言われるAdvanced Turbine Systems Program（ATS）が実施されていた。このプログラムはDOE（アメリカ合衆国エネルギー省）の下に関連政府機関、国立研究所、GEを中心とした複数のガスタービンメーカー、多数の大学が参加した国家プロジェクトで、日本と対比的に、ATSの主要な目的は天然ガス燃料のガスタービンコンバインドサイクル発電システムの効率を60%以上にする等、ビジネスに直結した現実的な内容となっている。こ

のプログラムの恩恵を最大限に受けたと思われるGE社の火力発電ビジネスは売上高営業利益率20%前後（GE社パワー部門、2015年12月期業績）の利益を上げており、ATSは米国産業の競争力強化に効果を発揮したと言える。WE-NETプロジェクトの中ではタービンは一部の要素に過ぎないが、ATSのようなタービンシステムの性能向上を目的としたプロジェクトは、ガスタービン及び蒸気タービン産業とその周辺産業の国際競争力の強化そのものを目的にすることができる。もちろん、タービンシステムの性能向上は発電所から発生する二酸化炭素量の低減に直接貢献するので、比較的短期間に着実に達成できる環境負荷低減の効果は大きい。

9. まとめ

WE-NET研究開発・第I期では水素燃焼タービンの単機出力500MW、タービン入口温度1700℃、目標発電端効率60%以上に設定して要素技術開発を行い、実際に水素を当量比の酸素で燃焼させる高温高压燃焼試験、冷却翼試験が実施され、第I期要素開発目標を達成した。プロジェクト開始時には単機容量500MWの実機製造までの長期計画を描いていたが、タービン技術以外の理由で開発は中断された。WE-NET第I期から既に18年以上経過し、水素燃焼タービンの研究開発を担当した技術者の多くは研究開発の現場を去っている。本稿は単なる過去の記録ではなく、得られた技術成果を有効に活用し、プロジェクト運営に関する得られた知見をこれからのガスタービン及び蒸気タービン関連プロジェクトに生かしたいと考えて執筆した。最近になって水素燃料が再び注目され、水素燃焼小型タービンに関する新しい技術論文も散見される。本稿が、WE-NET第I期のタービン技術開発成果の有効利用と継承に多少なりとも資することができれば幸いである。また過去の大形プロジェクトの経緯とその後の波及効果を十分調べて、ATSを質的に上回るタービン技術向上の国家規模のプロジェクトを、技術者や研究者が提案して行く必要があるのではないかと考える。

謝辞

WE-NETプロジェクト第I期が終了して既に18年を経て、プロジェクトに参加した技術者・研究者の多くは開発の現場を離れています。今回の特集記事の執筆に際しては、プロジェクトに参加した各機関の多くの皆様から資料や情報をご提供頂きました。特に、一般財団法人 発電設備技術検査協会 規格基準室長 佐藤 長光様には関連する報告書一式をお借りしました。また、WE-NETプロジェクトの中心メンバーだった三菱重工株式会社伊藤栄作様、元株式会社東芝の岡村隆成様、福田雅文様には、プロジェクトに関する詳細な情報と感想をお寄せ頂きました。お忙しいところ、ご協力頂いた皆様に心より感謝申し上げます。

引用文献

- (1) IEA Energy Technology Perspectives, (2014), pp. 30-36.
- (2) Tadashi Tanuma (ed.), Advances in Steam Turbines for Modern Power Plants, (2016), chapter 1, Woodhead Publishing, Elsevier.
- (3) WE-NET Home Page, 第1期研究開発の概要 (1996), <https://www.ena.or.jp/WE-NET/intro/chap2.html> (参照2016年9月14日).
- (4) 福田健三, WE-NETプロジェクトの模様替え—第I期研究開発成果と第II期計画—, 水素エネルギーシステム, Vol. 24, No. 2 (1999), pp. 31-46.
- (5) 大野哲雄, 水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術 (WE-NET), 計測と制御, Vol. 39, No. 1 (2000), pp. 41-47.
- (6) 笹倉正晴, 福田健三, 日本における水素エネルギー関連技術の歩みと現状, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 44, No. 4 (2016), pp. 2-8.
- (7) 水素燃焼タービンの開発 (WE-NET), 発電技検レビュー, No. 25 (1999), pp. 88-98.
- (8) 久留正敏, 上松一雄, 守井 淳, 森 秀隆, 山田 明, 水素利用国際クリーンエネルギーシステム (WE-NET) 用主機の開発, 三菱重工技報, Vol. 35, No. 1 (1998), pp. 56-59.
- (9) 岡村隆成, 川岸裕之, 古閑昭紀, 伊藤勝康, 水素燃焼タービンシステムの1700℃タービン冷却翼評価試験, 日本機械学会論文集 (B編), 66巻, 643号 (2000-3), pp. 845-852.
- (10) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 平成7年度成果報告書「NEDO-WE-NET-9583 水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術 (WE-NET) サブタスク8 水素燃焼タービンの開発 (タービン翼, ロータ等主要構成機器の開発)」(1995), pp. 1-594.
- (11) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 平成8年度成果報告書「NEDO-WE-NET-9683 水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術 (WE-NET) サブタスク8 水素燃焼タービンの開発 (タービン翼, ロータ等主要構成機器の開発)」(1996), pp. 1-475.
- (12) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 平成9年度成果報告書概要集「NEDO-WE-NET-97 水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術 (WE-NET)」(1997), pp. 1-111.
- (13) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 平成9年度成果報告書「NEDO-WE-NET-9783 水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術 (WE-NET) サブタスク8 水素燃焼タービンの開発 (タービン翼, ロータ等主要構成機器の開発)」(1997), pp. 1-308.
- (14) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 平成10年度成果報告書概要集「NEDO-WE-NET-98 水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術 (WE-NET)」(1998), pp. 1-112.
- (15) 水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術 (WE-NET) 研究開発・第I期最終評価報告書, 産業技術審査会 評価部会 水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術研究開発評価委員会, 平成11年12月 (1999), pp. 1-206.
- (16) 高橋武雄, 池田一隆, 次世代発電システム, 東芝レビュー, Vol. 56, No. 6, (2001), pp. 25-29.

特集：大型プロジェクトに学ぶ：航空機エンジン及び発電タービン技術・産業の将来への提言

来るべき水素社会を先取りしたWE-NETプロジェクトにおける 水素燃焼タービンと超高温材料技術

Hydrogen Combustion Turbine and Ultra-high Temperature Materials Technology in the WE-NET Project Going Ahead of the Coming Hydrogen Society



新田 明人*1
NITTA Akito

キーワード：水素社会，WE-NET，水素燃焼タービン，CO₂回収クロードサイクルガスタービン，超高温材料
Hydrogen Society, WE-NET, Hydrogen Combustion Turbine, CO₂ Recovery Closed Cycle Gas Turbine, Ultra-high Temperature Materials

1. はじめに

2011年3月11日以降，原子力発電量の激減，それを補う火力発電量の増大やそれを支える化石燃料の輸入増大等々，わが国のエネルギー環境は急変した。このような状況のもとで，2015年7月に長期エネルギー需給見通し（エネルギーミックス）が決定された⁽¹⁾。それによると，S+3E（安全性，安定供給，経済効率性，環境適合）の同時達成を基本方針とし，2030年度におけるバランスのとれた電源構成として図1が提示された。また，環境適合の観点から，温室効果ガスを2013年度比で2030年度に

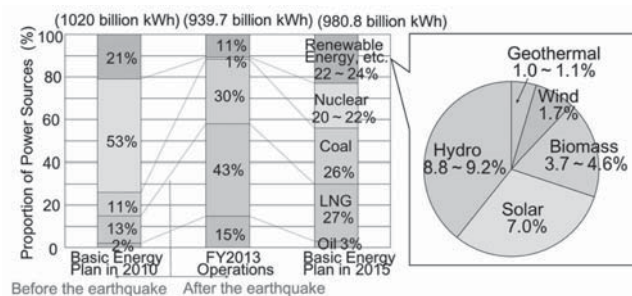


Fig. 1 Electric power source composition in FY2030⁽¹⁾.

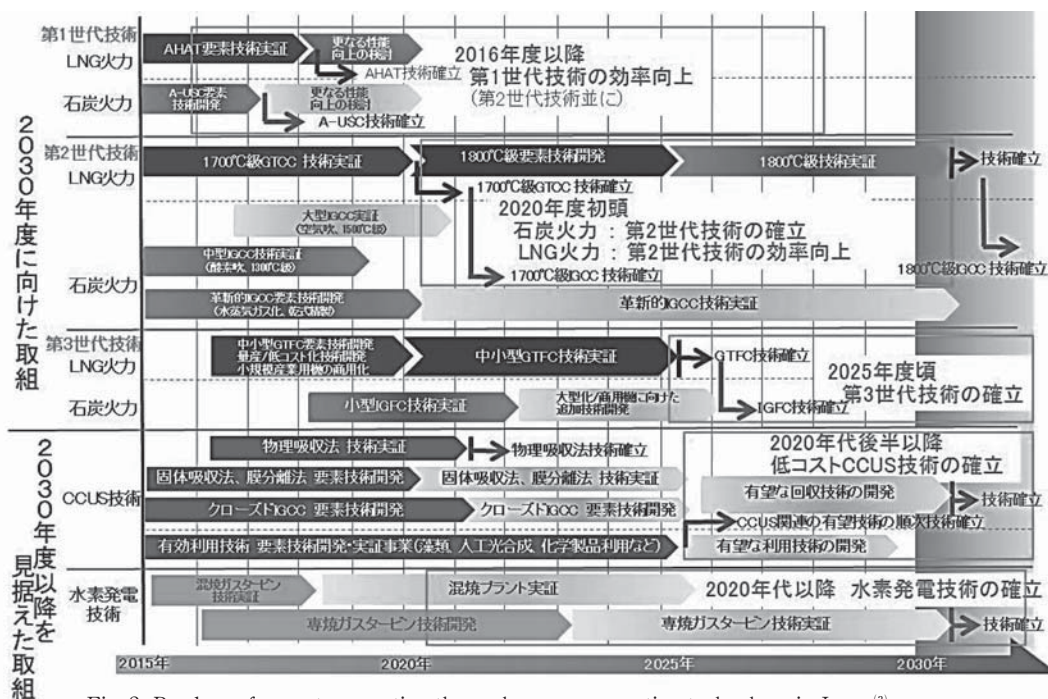


Fig. 2 Roadmap for next-generation thermal power generation technology in Japan⁽³⁾.

原稿受付 2016年9月1日

*1 (一財)電力中央研究所 名誉特別顧問

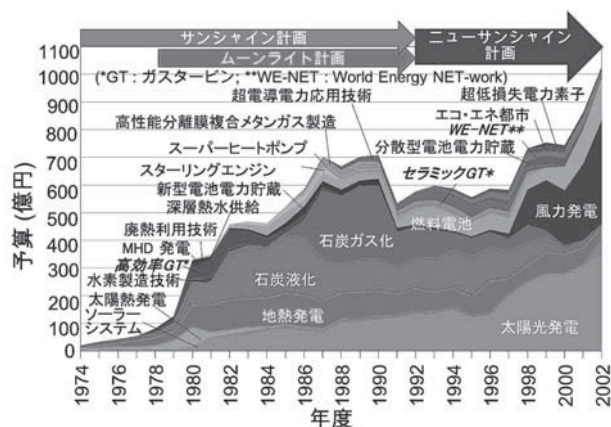


Fig. 3 Change in R&D budget of Japan's national energy-related projects from 1974 to 2002⁽⁴⁾.

26%削減するという目標が設定された⁽²⁾。さらに、今後も電力供給に大きな役割を担う火力発電（2030年度時点で56%，図1参照）には，3E実現のためにより一層の高効率化が求められることから，2016年6月に次世代火力発電に係る技術ロードマップ（図2⁽³⁾）が提示された。なお，このロードマップには，2030年度以降を見据えた取り組みとして，水素発電技術が挙げられている。

ところで，わが国のこのような将来に向けた技術革新には，これまで多くの国家プロジェクト（国プロ）が貢献してきた。図3⁽⁴⁾は代表的な国プロであるサンシャイン計画，ムーンライト計画およびそれらを統合したニューサンシャイン計画における予算（1974～2002年度の累計総額は14,116億円）の推移を示しているが，これらの国プロの費用対効果は概ね妥当であったと評価されている⁽⁴⁾。また，これらの国プロにはガスタービン技術に関するプロジェクトも含まれるが，それらの成果はわが国のガスタービン技術の発展に多大に貢献してきた⁽⁵⁾⁽⁶⁾。図4はこれらの国プロおよびそれ以降のガスタービンに関連したプロジェクトの推移・展開を示している。

同図内には，ニューサンシャイン計画において実施された水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術研究開発（WE-NET：World Energy Network）も挙げられているが，これは今思うに来るべき水素社会を先取りしたプロジェクトであった。ここでは，本プロジェクトにおいて進められた水素燃焼タービン，特にその成立性を左右する重要な技術課題であった超高温材料技術に焦点を絞り，得られた成果とその後の成果の活用・展開について述べる。

2. WE-NETと水素燃焼タービンプロジェクトの概要

WE-NETプロジェクトならびにその前後の水素エネルギー技術開発の経緯については，既に本誌で紹介されているので⁽⁷⁾，ここでは概要を述べるに留める。

WE-NETプロジェクトは，1993年度から始まったニューサンシャイン計画のなかで元々28年間（1993～2020）に及ぶ超長期プロジェクトとして構想されたが，最終的には第Ⅰ期（1993～1998）および第Ⅱ期（1999～2002）にわたる研究開発で終了した⁽⁸⁾。その目的は，世界に偏在する水力，太陽光，風力等のクリーンな再生可能エネルギーを利用した水の電気分解によって水素を製造し，それをエネルギー消費地まで輸送し貯蔵した後，発電・輸送用燃料・都市ガス等に幅広く利用することであった。その概念を図5⁽⁸⁾に示すが，これはまさに現在2030年以降に実現が期待されている水素社会を先取りしたものであったといえる。

さて，水素利用形態のなかで，大規模・集中利用ができるのは発電である。発電時の水素・酸素燃焼では水しかできずCO₂フリーであるとともに，燃焼ガス温度は約3000℃まで上げられることから高い発電効率も期待できる。そこで，WE-NET第Ⅰ期では，図6⁽⁹⁾に示す実施体制の下で，タービン入口温度（TIT：Turbine Inlet Temperature）1700℃，発電端効率60%（HHV基準）

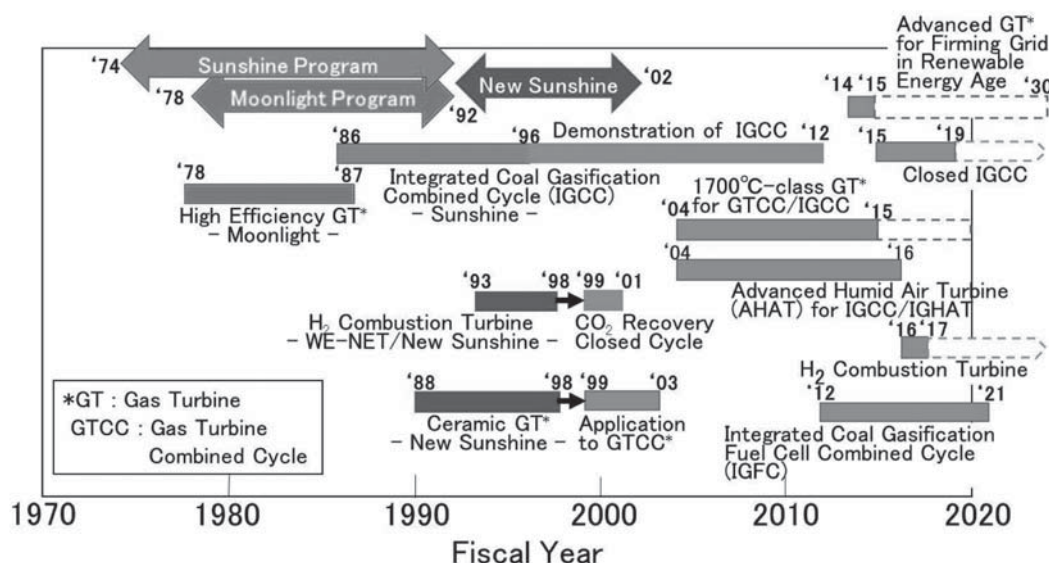
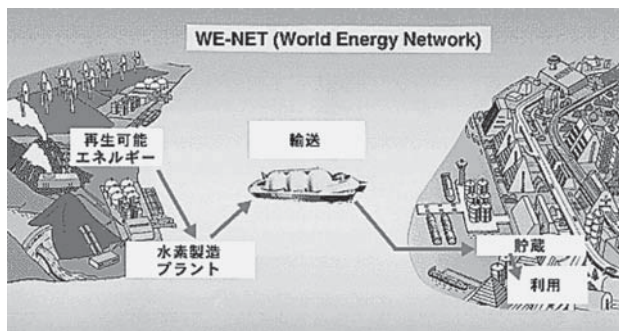
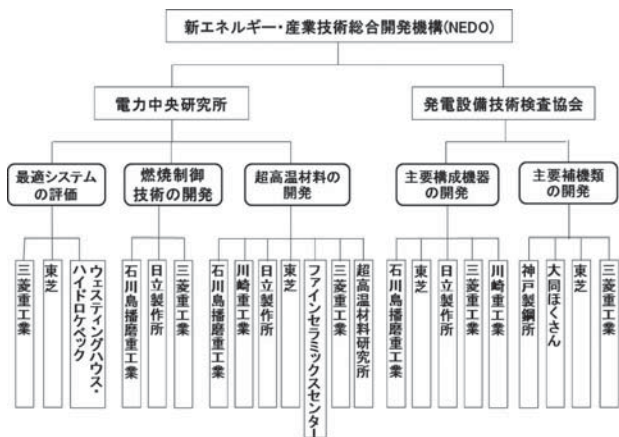


Fig. 4 National projects on new gas turbine technology.

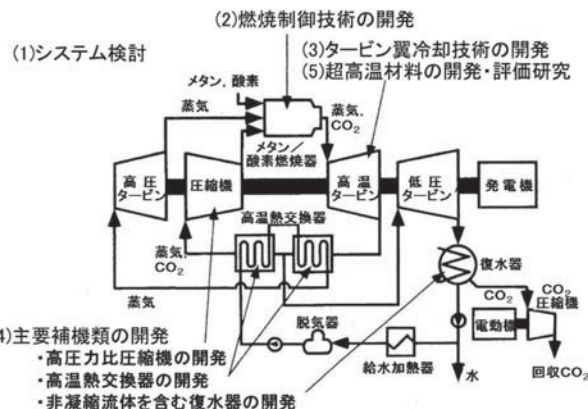
Fig. 5 Concept of the WE-NET project⁽⁸⁾.Fig. 6 R&D structure of hydrogen combustion turbine⁽⁹⁾.

以上を目標とする水素燃焼タービンの研究開発が進められた。また、その開発項目は、①最適システムの評価（サイクルの検討・評価）、②燃焼制御技術の開発（水素・酸素燃焼器の開発）、③主要構成機器の開発（タービン翼・ロータ冷却技術の開発）、④主要補機類の開発（高温熱交換器、酸素製造設備の開発）、⑤超高温材料の開発（超高温材料の開発・評価技術開発）であった。

水素燃焼タービンの研究開発は着実に進展し所期の目標を達成したが、将来の水素燃料の大量供給に目途が立たず、また当時の燃料電池関連技術実用化を重視するという方針転換と相俟って、水素燃焼タービンの研究開発は第Ⅰ期中止された⁽⁷⁾⁽⁹⁾。ただし、得られた貴重な成果を活用するため、燃料を容易に確保できる天然ガス（メタン）に変えたメタン・酸素燃焼ガスタービンの研究開発が継承プロジェクトとして立ち上げられた⁽⁹⁾。これは、水素燃焼タービンと同様にトッピング再生サイクルでTIT1700℃、発電端効率60%（HHV基準）以上を目標とするとともに、発電システムをクローズド化することにより、メタン・酸素燃焼で発生するCO₂を大気中に排出しない画期的なガスタービン（CO₂回収対応クローズド型高効率ガスタービン）であった⁽⁹⁾。図7⁽⁹⁾に本発電システムの構成例と研究開発課題を示す。なお、本プロジェクトも着実に成果をあげていたが、当時の電力需要が低迷する情勢から国の電力技術開発に対する政策的ウェイトが大規模電源から中小規模分散電源にシ

フトしたことにより、当初5カ年計画（1999～2003）であったものが3年で中断された。

このように高効率で環境安全性に優れた、画期的なガスタービン技術に関するプロジェクトはいずれも計画途中で中止されたが、これは、当時の社会情勢から考えると、実用化を論じるには早過ぎた計画であったからだといえる。しかし、その概念や研究成果は、図2に示した2030年度以降を見据えた次世代火力発電技術として、水素発電技術やクローズド石炭ガス化複合発電（IGCC）に継承されており、それに向けた国プロも始められている⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。

Fig. 7 System and R&D subjects of CO₂ recovery closed cycle gas turbine⁽⁹⁾.

ところで、これまでの火力発電の高効率化は耐熱材料技術の進歩によるところが大であったことはよく知られている^{(12)~(14)}。上述したように、水素燃焼タービンおよびその後継のCO₂回収対応クローズド型ガスタービンにおいても、これらを成立させるための重要課題の一つとして、超高温材料の開発・評価が挙げられている。そこで、以下では、その当時取り組まれた超高温材料に関する研究開発を振り返るとともに、得られた成果の今後の活用・展開に言及する。

3. 水素燃焼タービンのための超高温材料技術

WE-NET第Ⅰ期の水素燃焼タービンのTITは1700℃を目標としたが、燃焼ガス温度は場所により±200～300℃程度変動することから、材料使用温度に裕度を持たせるため、耐用温度2000℃を目標に図8に示す材料が選定され、素材レベルでの基本特性と製法等の基礎技術に関する検討が行われた⁽⁹⁾⁽¹⁵⁾。その概要を以下に述べる。

3.1 ハイブリッド冷却動翼

これは、耐熱衝撃性に優れ、かつ薄いフォームの成形と冷却孔の形成が可能で軽い耐熱材料である繊維強化セラミックス（FRC：Fiber Reinforced Ceramics）を断熱層ならびに高性能冷却層として用いることにより、高温化に対応するものであった。また、強度を負担する支柱部には高温破壊の起点となる結晶粒界のない単結晶（SC：Single Crystal）超合金を用いることで、より一

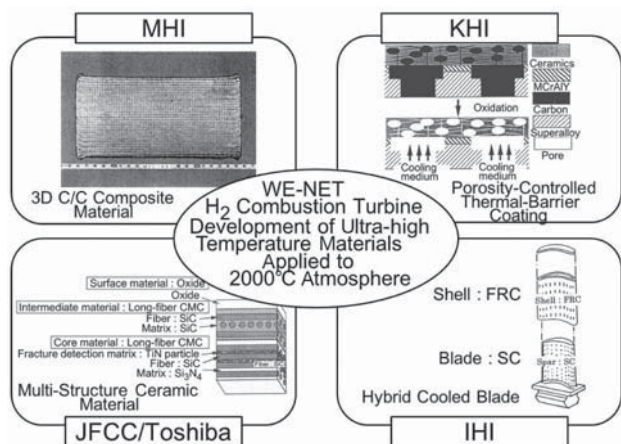


Fig. 8 Concept of materials applied to 2000°C atmosphere.

層の高耐熱（高強度）化を狙うものであった。

このうち、SC超合金については、水素・酸素燃焼ガス環境のマイルド性を勘案し、物質・材料研究機構（NIMS）が開発した国産SC超合金TMS63（Ni-6.9Cr-7.7Mo-5.8Al-8.4Ta）をベースに、耐環境性を向上させる合金元素のCrを無添加とすることでクリープ強度の改善を狙った新合金95-Mod.D（Ni-6Mo-4.8W-5.3Al-0.5Ti-6.0Ta-6.0Re）が開発された。開発合金は、当時のTIT1700℃級ガスタービンの冷却翼用候補材料であった米国開発の第2世代SC超合金CMSX-4と同等以上のクリープ強度を有することが確認された。また、Cr無添加の開発合金の耐酸化性は、Cr含有量が10wt%程度の普通鋳造超合金や8wt%程度のSC超合金と同等であることも確認された。

一方、FRCについては、冷却用小孔の面積分布が15%となる薄肉中空状の成形が可能となり、さらに気相反応と液相含浸焼成による緻密化を図ることで動翼の遠心力による応力（約70MPa）を上回る室温強度が得られた。

3.2 気孔率制御遮熱コーティング

新概念の遮熱コーティング（TBC：Thermal Barrier Coating）として、気孔率制御TBCが考案された。その施工プロセスは、①冷却孔に炭素を充填した基材にボンドコーティング（MCrAlY合金）を施工し、その後加工した冷却孔に炭素を充填する、②ボンドコーティング上にセラミックスと炭素の混合粉末を溶射する、③炭素を燃焼・酸化させて冷却通路を形成するが、その際炭素の混合率に応じて気孔率を制御する、というものであった。

このとき基材にはSC超合金CMSX-4、ボンドコーティングにはCoCrAlY合金が選定された。また、トップコーティングには、気孔率を制御するための粉末材料として、8wt%イットリア（ Y_2O_3 ）で安定化させたジルコニア（YSZ：Yttria Stabilized Zirconia）粉末に、YSZ粉末（粒径5 μm 以下の8wt%YSZ）を30%被覆した炭素粉末を混合させたものが選定された。混合比の異なる粉末を用いて大気プラズマ溶射（APS：Atmospheric Plasma Spray）により施工したコーティング膜の気

孔率と空気の浸透係数の関係を実験的に求めた結果、30%YSZ被覆炭素（5～45 μm ）とYSZの混合粉末の混合比は2：1～1：2の範囲内に最適値があることが明らかにされた。また、別途求めた本TBCの熱物性値（線膨張係数、熱伝導率）と冷却通路面積を用いて行った伝熱計算の結果から、TBC表面温度および界面メタル温度は設定値を満足し、本TBC構造が成立し得ることも確認された。

3.3 セラミックス系多重構造材料

本概念は、全体の機械的強度を担う芯部材料、高耐熱性や低熱伝導性等により芯部材料を保護し芯部材料と表面部材料を連結する中間部材料、および耐環境性を担保する表面部材料から成るものであった。特に、強度を担う芯部材料には導電性のある窒化チタン（TiN）を配し、そのき裂進展に伴う電気抵抗の変化から破壊検知機能が付与させた。芯部材料には、窒化ホウ素（BN）を被覆した耐熱炭化ケイ素（SiC）の繊維と窒化ケイ素（ Si_3N_4 ）のマトリックスから成るセラミック基複合材料（CMC：Ceramic Matrix Composite）を選定し、マトリックスの緻密化や適切な熱処理による粒界相の結晶化等により、高強度・高靱性材料が開発された。また、中間部材料は長繊維SiC/SiCマトリックスのCMC、表面部材料はアルミナとする多重構造材料の成立性も確認された。

3.4 三次元繊維複合材料

炭素系複合材料（C/C：Carbon/Carbon Composites）は、500℃以上で耐酸化性に問題があるものの、他の材料より比強度（＝引張強度／密度）が大きく2000℃でも強度低下しないことから、無冷却部品としての適用が期待された。そこで、C/Cを対象に、翼材料に要求される高温強度と靱性を確保するため、繊維を3次的に織り上げることにより相間はいく離が防止できる3次元繊維複合材料の開発が進められた。その結果、3次元織に適した繊維およびそれらの繊維に適した安定なマトリックスを選定するとともに、繊維配向を変えられる3次元製織法や最適な複合材料化手法を選定することにより、目標としたNi基超合金IN738の900℃における比強度を上回るC/Cが開発された。

3.5 超高温材料試験評価技術

上述したような超高温材料の開発においては、その基本特性を的確に試験評価することが開発ニーズを明確にする上で不可欠である。そのような試験評価技術のうち、力学特性については、引張、曲げ、疲労、クリープなどの材料強度試験が2000℃まで可能になった。また、熱物性（熱拡散率、比熱、熱膨張率、放射率など）については、1500～2000℃まで測定可能な方法が開発された。さらに、化学特性として、水蒸気中での高温酸化試験が1700℃、1気圧以下の条件下で行える技術が開発された。しかし、超高温材料の実使用環境を考えると、より超高温高圧下の水蒸気環境中における強度特性評価試験法の開発などが必要とされた。

4. CO₂回収対応クローズド型高効率ガスタービンのための超高温材料技術

図7に示したCO₂回収対応クローズド型高効率ガスタービンプロジェクトのなかでも、超高温材料の開発・評価研究が引き続き行われた⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。そのなかでは、図9⁽¹⁶⁾に示すように、遮熱コーティング (TBC)、セラミック基複合材料 (CMC) および超高温材料評価技術の開発が進められた。その概要⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾を以下に述べる。

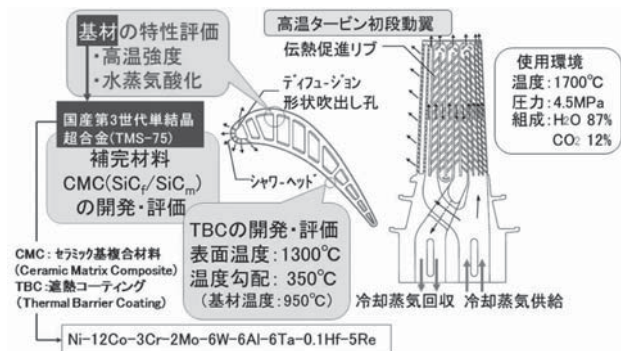


Fig. 9 R&D subjects of ultra-high temperature materials for CO₂ recovery closed gas turbine⁽¹⁶⁾.

4.1 遮熱コーティング

本プロジェクトでは、TIT1700°C級の蒸気冷却タービン動翼の早期実現のため、動翼材には、WE-NET第I期で開発されたSC超合金が第2世代相当であったことから、当時まだ発電用ガスタービン大型翼には実用化されていなかった第3世代SC合金 (第2世代より高強度) を候補材とし、NIMSが開発したTMS-75 (Ni-12Co-3Cr-2Mo-6W-6Al-6Ta-0.1Hf-5Re) が選定された。また、本合金の耐用温度は950°C程度であったため、蒸気冷却とTBCの採用が不可欠とされた。しかし、WE-NET第I期で開発された気孔率制御TBCは実用化までに長時間を要することから、新たに耐環境性に優れたTBC材料とプロセス技術を開発することになり、開発目標として、最高表面温度1300°C以上および許容温度差 (コーティング表面と基材表面の温度差) 350°C以上が設定された。

このような高い目標に対し、当時のYSZでは、耐熱サイクル性 (はく離)、遮熱性能の低下等の長時間に及ぶ耐久性・信頼性が懸念されたため、図10⁽¹⁶⁾に示す研究体制の下でそれぞれの課題が分担実施された。

このうち、ジルコニア (ZrO₂) トップコートの安定化剤については、それまでほとんど報告例がなかった希土類 (ランタノイド) 系酸化物に注目し、トップコートの表面温度を1420°Cとした過酷なCO₂レーザ熱サイクル試験によりはく離発生までの回数が調べられた。このとき対象とした希土類系酸化物はネオジウム (Nd₂O₃)、サマリウム (Sm₂O₃)、ガドリウム (Gd₂O₃) およびエルビウム (Er₂O₃) であるが、図11⁽¹⁵⁾からわかるように、エルビウム部分安定化ジルコニア (ErSZ) が最も耐熱サイクル性に優れていた。その他、ErSZは高温安定性 (焼結性、

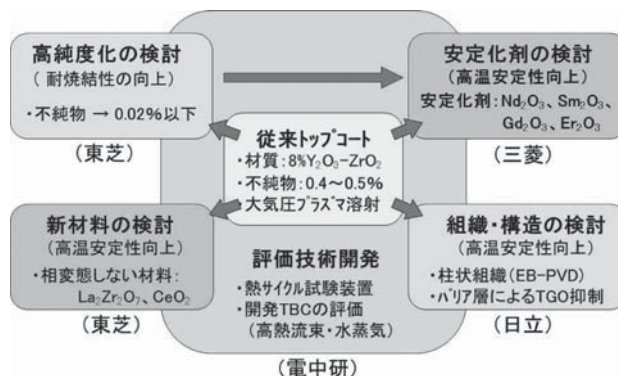


Fig. 10 R&D subjects for development of new TBCs⁽¹⁶⁾.

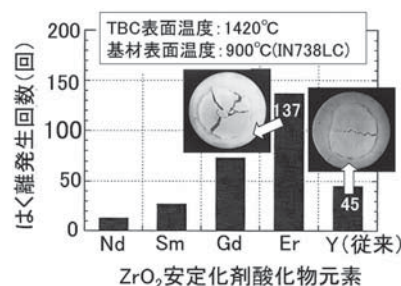


Fig. 11 Effect of lanthanide-oxide stabilizer in spallation resistance of TBCs⁽¹⁵⁾.

結晶構造、ヤング率、線膨張係数、熱伝導率等) にも優れており、有望なチップコート材となり得るものと評価された。

また、トップコートの耐熱サイクル性をより一層向上させるため、トップコートを柱状組織化する電子ビーム物理蒸着 (EB-PVD: Electron Beam Physical Vapor Deposition) 法が適用され、APSに比し耐熱サイクル性が格段に向上することが確認された。ただし、柱状組織の特長として熱応力の緩和は期待できるが、酸化・腐食成分の通路にもなり得ることから、トップコートとアンダーコートの境界にアルミナ等のバリア層を設けて遮熱性と耐環境性を兼備したTBCシステムが考案された。

4.2 セラミック基複合材料

上述した金属系材料による1700°C級タービン翼を補完するものとして、WE-NET第I期で部品化プロセスに見通しが得られたCMC (SiC_f/SiC_m) を対象に部品化までを視野に入れた研究開発が行われた。その結果、素材レベルでは、強度・靱性に関する所期の目標は達成された。しかし、図12⁽¹⁵⁾に示すように、CMC基材はムライトコーティング材を含め、高温高速燃焼ガス流中 (燃料: プロパンガス) ではガス温度とともに減肉量が増大することが明らかにされた。この減肉現象には燃焼ガス流中の水蒸気が影響することが知られていた⁽¹⁷⁾ことから、減肉を抑制・防止する耐環境性コーティング (EBC: Environmental Barrier Coating) の開発が重要課題とされた。

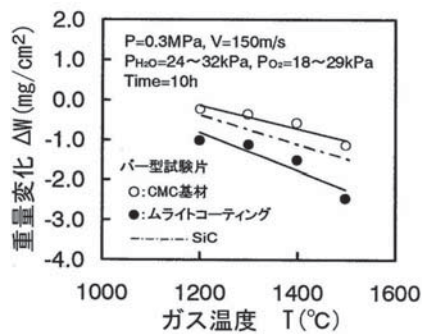


Fig. 12 Weight change of CMC in combustion gas flow¹⁵⁾.

4.3 超高温材料評価技術

材料開発に不可欠な材料評価技術については、WE-NET第I期で開発された評価技術を用いてSC超合金(TMS-75)の高温強度、熱物性、水蒸気酸化等の基本特性が評価されるとともに、上述したTBCおよびCMCの耐環境性等の評価技術が開発された。

5. おわりに(過去から将来に向けた国プロへの期待)

水素燃焼タービン用に開発が進められた超高温材料はいずれも画期的なものであり、その後1700℃級ガスタービン翼材料として開発されたSC超合金¹⁸⁾を除くと、その概念は現在でも通用する革新的なものであるといえる。換言すればその実用化は容易ではないということとなり、CO₂回収対応クローズド型高効率ガスタービン用には実現可能性の高い材料開発が進められたが、セラミックス利用における本質的な課題として、耐環境性コーティング(EBC)の開発などは依然残されているといえる。

ここで紹介した国プロにおけるガスタービン用超高温材料技術のその後の進歩を追うと、1700℃級ガスタービン用にSC超合金やTBCの開発は着実に進められてきた¹⁸⁾が、CMCやEBC等の現状を見ればセラミックス材料の実用化に関しては課題が山積しているように思われる。

これまで技術革新が新材料の登場によって実現した事例は多いが、このような事例は今後も続くものと期待される。図2に示した国の次世代火力発電技術として挙げられている1800℃級ガスタービンや水素燃焼タービンにおいても、超高温材料技術の進歩に負うところは大きいといえる。特に、このような次世代火力発電プラントの実現に不可欠な構造材料は実用化までに少なくとも10年以上のリードタイムを必要とする。したがって、その開発にはできる限り早く取り組まなければならないが、リスクを伴う革新的な材料技術の開発には国プロの果たす役割が大きい。その故、これまでと同様、世界をリードできる次世代火力発電技術の実現に向けた国プロがタイムリーに推進されるとともに、新しい材料技術がその一翼を担うことを大いに期待したい。

参考文献

- (1) 経済産業省長期エネルギー需給見通し<<http://www.meti.go.jp/press/2015/07/20150716004/20150716004.html>> (参照日2015年7月16日)。
- (2) 環境省地球温暖化対策計画<<http://www.env.go.jp/press/102512-print.html>> (参照日2016年5月13日)。
- (3) 経済産業省次世代火力発電に係る技術ロードマップ<<http://www.meti.go.jp/press/2016/06/20160630003/20160630003.html>> (参照日2016年6月30日)。
- (4) 木村宰, 小澤由行, 杉山大志, 政府エネルギー技術開発プロジェクトの分析—サンシャイン, ムーンライト, ニューサンシャイン計画に対する費用効果分析と事例分析—, 電力中央研究所研究報告:Y06019 (2007)。
- (5) 大田英輔, 川口修, 藤岡照高, 長谷川武治, 日本ガスタービン学会を支えてきたIGTCと日本ガスタービン産業界, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 41, No. 1 (2013), pp. 2-9。
- (6) 正田淳一郎, 発電用ガスタービン技術の変遷と将来展望, 日本機械学会誌, Vol. 119, No. 1173 (2016), pp. 434-437。
- (7) 笹倉正晴, 福田健三, 日本における水素エネルギー関連技術の歩みと現状, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 44, No. 4 (2016), pp. 222-228。
- (8) WE-NETホームページ<<https://www.ena.or.jp/WE-NET/>> (参照日2016年7月22日)。
- (9) 久松暢, 水素燃焼タービン第I期研究開発成果及び二酸化炭素回収対応クローズド型高効率ガスタービン技術第I期研究開発計画について, NEDO水素・アルコール・バイオマス技術分科会第19回事業報告会, (1999), pp.57-80。
- (10) NEDOホームページ水素専焼タービンの先導的研究開発等に着手<http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100596.html> (参照日2016年7月25日)。
- (11) NEDOホームページ次世代のCO₂回収型石炭ガス化複合発電システム開発に着手<http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100421.html> (参照日2016年8月19日)。
- (12) 新田明人, 発電用タービンの効率向上, 日本機械学会誌, Vol. 96, No. 893 (1993), pp. 298-301。
- (13) 原田広史, 鉄井利光, 谷月峰, 藤岡順三, 川岸京子, 松本一秀, ガスタービンの技術革新を支える材料技術の過去40年の進歩と将来動向, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 41, No. 1 (2013), pp. 85-92。
- (14) Nitta, A., Contribution of High-Temperature Materials to Energy Mix for Achieving S+3Es in Japan, Proceedings of 123HiMAT-2015, (2015), pp. 3-5。
- (15) 新田明人, 次世代超高温ガスタービンと新材料の開発, 材料, Vol. 51, No. 5 (2002), pp. 587-593。
- (16) 新田明人, 久松暢, 1700℃級ガスタービン用超高温材料の開発・評価—CO₂タービンプロジェクトにおける成果を中心に—, 日本材料学会第39回高温強度シンポジウム前刷集, (2001), pp. 1-5。
- (17) 百合功, 久松暢, 餌取良幸, 山本融, 高温拘束燃焼ガス流中における炭化けい素の減肉減少に関する研究(減肉に対する影響因子の検討), 日本機械学会論文集(A編), Vol. 66, No. 645 (2000), pp. 1053-1059。
- (18) 岡田郁生, 原田広史, 発電用ガスタービンの材料の変遷と将来展望, 日本機械学会誌, Vol. 119, No. 1173 (2016), pp. 454-457。

特集：大型プロジェクトに学ぶ：航空機エンジン及び発電タービン技術・産業の将来への提言

二つの国家プロジェクトで行われたガスタービン用 耐熱合金の研究開発

R&D of High Temperature Alloys for Gas Turbines in the Past Two National Projects in Japan



山崎 道夫^{*1}
YAMAZAKI Michio

キーワード：超耐熱合金，チタン合金，合金設計，ガスタービン，ジェットエンジン
Superalloy, Ti Alloy, Alloy Design, Gas Turbine, Jet Engine

1. 緒言

現在つくば市にある，物質・材料研究機構の前身の一つである金属材料技術研究所（中目黒）の私の研究グループは，工業技術院のプロジェクトとして，合金開発を2回も担当させていただいた。そのプロジェクトの概要と合金及び合金設計について簡単に説明したい。また，民間企業が分担した，開発合金を用いた，ガスタービンの部品の製造研究についても説明する。

なお，両プロジェクト共，ガスタービンとジェットエンジンの高温部分の材料の研究を目的にしたものである。

2. 高効率ガスタービン（1978年から1984年）

その当時，工業技術院は通産省に属し，私がいた金属材料技術研究所は科学技術庁に所属していたので，工業技術院から予算をもらうのは容易ではなかった。特に，この一回目のプロジェクトでは，我々に知名度がなく，予算をいただくのに，かなり苦労した覚えがあるが，詳細はあまり覚えていない。おそらく，同じ科学技術庁の航空宇宙技術研究所が参画した，「高効率ガスタービン」（ムーンライト計画）の研究開発を担当していた松木正勝部長に相談したのであろう。

筆者等の金属材料技術研究所のグループは，ガスタービンの動翼及び静翼を製造するNi基の超耐熱合金の開発を担当し，独自の合金設計法（後述）を開発し，かなり優秀な合金を得た。⁽¹⁾

これらの開発合金により普通鑄造及び一方向凝固柱状晶の複雑な形状の空冷タービンプレードが，プロジェクトに参加した民間各社（このプロジェクトのために設立された高効率ガスタービン研究組合のメンバー）により作成され，高温回転試験を無事に行うことができた。

このプロジェクトに参画した材料関係の民間の会社名

（当時）とその担当は下記のようなのである。

添加元素量が高い合金の場合，組成が正確で，かつ均一で，酸素や窒素が低い合金の棒を予め製造し，製品の鑄造の際，これを再溶解して用いられることがある。この合金の棒のことをメルティングストックと呼ぶ。この製造技術の向上は，Ni基合金のような高濃度合金の品質保持には不可欠なものと考えられ，大同特殊鋼が研究を担当した。カルシア（酸化カルシウム）製のルツボの使用などが研究された。

三菱金属と日立金属は開発合金を用いて，動翼と静翼の普通精密鑄造を担当し，鑄造方案の研究および熱処理の研究を実施した。

石川島播磨重工業は開発合金と既存合金を用い，一方向凝固柱状晶の動翼の製造研究を実施した。

神戸製鋼は鑄造品の鑄造欠陥の除去を目的として，HIP（高温静水圧処理）の研究を実施した。

電力中央研究所と東芝は，開発合金による一方向凝固材の疲れ試験等を実施した。

3. 超耐熱合金について

二つのプロジェクト研究では，主に，超耐熱合金を扱ったので，ここで，この合金に関する簡単な説明をしたい。しかし，本稿で説明するプロジェクト研究は25年以上前に行われたものであるので，最近の知見は含まれていないが，筆者は二つのプロジェクト研究終了後，約10年間，私立大学で，担当講義の一つとして，ガスタービン材料に関する講義も行ったので，非常に時代遅れになってはいないと考えている。

耐熱合金としては，Fe基，Co基，Ni基があるが，Ni基合金が多用される。それは，NiにAlを加えると，NiにAlが固溶したガンマ相とともにNi₃Al（ガンマプライム相と呼ばれる）という結晶が合金の中に細かく生成，分散し強化に寄与するためである。これに，更に色々の元素を添加するとこれら二つの相に分配されて固溶

原稿受付 2016年8月5日

*1 元・科学技術庁金属材料技術研究所

し、両相のNiとAlの一部と置き換わってくる。「相」とは、説明しにくいですが、均一な組成で同じ結晶構造のものが広がっている物質の範囲である。数種類の元素が合金に加えられると各元素はガンマ相とガンマプライム相に分配され、合金強度等に様々な影響を与える。

多結晶合金という用語を説明しよう。普通の金属や合金はほとんど多結晶である。細かい結晶状の金属元素の粒（約1mm以下）が無数に集合し、ほとんど隙間なく固着している。結晶の粒はいろいろな方向を向いているので、界面ができ、それらを結晶粒界という。

金属や合金を溶かして固めるか更に塑性加工と焼鈍を行うと、通常は上記の多結晶状態になる。結晶と結晶の界面は常温では強度が大きいですが、高温では弱くなる。

上記の高効率ガスタービンのプロジェクトで試作されたNi基超耐熱合金翼は普通の鑄造及び一方向凝固による鑄造で製造された、多結晶状のものである。溶融状態の合金を型に流し込んで固めると（普通鑄造）、あちこちに結晶の粒が生成し、多結晶状に凝固する。この状態の物を高温（例えば、900℃）で長時間荷重をかけると、結晶粒界で割れてしまう。そこで米国で考案されたのが、一方向凝固柱状晶合金と単結晶合金である。前者では、引張方向（タービンプレードでは遠心力の加わる方向）に垂直な結晶粒界が少ないため、後者ではそもそも結晶粒界がないため、高温での破壊が抑制される。高効率ガスタービンのプロジェクトでは、一方向凝固合金まで研究され、次の高性能結晶制御合金のプロジェクトでは単結晶合金その他も研究された。

Ni基合金の場合、ガンマ相とガンマプライム相の2種の結晶があるのに、単結晶になるのはなぜかという質問を受けたことがある。単結晶になるのは、ガンマ相であり、その中に、細かいガンマプライム相が生成して来るのである。比喩的に言えば、水晶の大きな結晶（単結晶）の中に細かいサファイヤの結晶が分散しているようなものである。

図1は両プロジェクトにより試作された空冷ガスタービン動翼である。左から普通鑄造によるランダムな多結晶材、一方向凝固柱状晶材、一方向凝固単結晶材である。全て金属材料技術研究所で開発された合金を用い、プロジェクト参加の民間会社（石川島播磨重工）で製造されたものである。

4. 高性能結晶制御合金プロジェクト

高効率ガスタービンのプロジェクト中での耐熱合金の研究の後半の3年間に重複して、同じく通産省の工業技術院により、耐熱合金を中心にした「高性能結晶制御合金」の研究開発（1981年から8年間）が行われた。

「高性能結晶制御合金」というのは一般名ではなく、プロジェクトの特徴を表す名称である。合金の成分のみでなく、製法による結晶の状況も制御するという意味である。

高効率ガスタービンのプロジェクトでの合金設計の成果があったため、このプロジェクトでも、異なる省庁である科学技術庁の金属材料技術研究所の我々のグループに合金開発（合金設計による合金の組成の探索）が任された。耐熱合金の他、Ti合金の開発も担当した。⁽²⁾

プロジェクト名からも分かるように、我々金属材料技術研究所の合金の組成の研究の他、結晶制御のための各種の製造プロセスが多くは民間会社により分担された。工業技術院の技術研究所もプロセス関係の研究を分担した。

工業技術院の方針により、民間会社のプロセス研究は新しく設計された合金を用いて行うべきであるとされた。民間の方からは、実用になるかどうか不明な段階での新合金による製造プロセスの研究より、既存の合金を用いて研究したいと考えるのは当然で、多少のいざこざが生じたと覚えている。

高性能結晶制御合金のプロジェクトで実施されたテーマと担当機関名（当時）を記すと下記のようなものである。

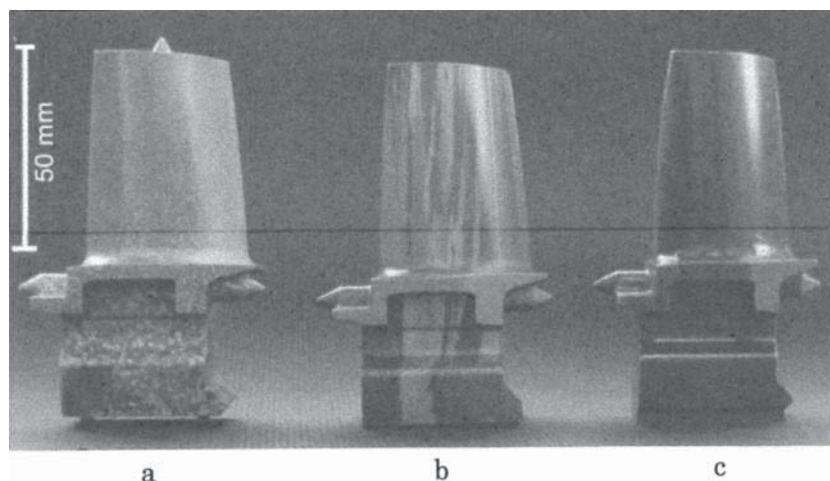


Fig. 1 Air-cooled turbine blades made of newly (at that time) developed Ni-base superalloys; casting: by I.H.I.
a: Conventional casting b: Directional solidification (columnar) c: Single crystal

「単結晶合金技術」

合金設計（金属材料技術研究所）；セラミックモールド技術（名古屋工業技術試験所）；メルティングストック製造技術（大同特殊鋼）；熱制御単結晶製造技術（石川島播磨重工）；熱・対流制御単結晶製造技術（日立製作所，日立金属）

「超塑性合金技術」

Ni基耐熱強靱合金設計技術（金属材料技術研究所）；Ti基軽量強靱合金の合金設計技術（金属材料技術研究所）；超塑性機構の基礎的研究（機械技術研究所）；高温成形用型技術（機械技術研究所）；Ni基超合金微粉末製造技術（大同特殊鋼）；Ni基超合金粉末を利用した超塑性加工技術（神戸製鋼所）；Ni基超塑性合金のCIP（cold isostatic pressing）技術（住友電工）；Ni基超塑性合金薄膜材の超塑性（日立製作所）；Ti基合金の微細粒粉末超塑性技術（三菱金属）

「粒子分散強化合金技術」

合金設計（金属材料技術研究所）；機械的合金化技術（住友電工）；鍛造技術（神戸製鋼所）；熱処理・加工技術（IHI）

このプロジェクトの研究成果および関連既存技術の調査の結果は日本規格協会により出版された⁽³⁾。これは約700ページの出版物で、定価は6万8000円であったが、現在、ネットで検索すると、これよりもかなりの高値で出品されている。

5. 合金設計（Ni基）

金属材料技術研究所が行った合金設計は完全なものではないが、現実的にはかなり役にたった。一般に設計というと、試作する前に設計されるものの特性が分かるというイメージに聞こえるが、材料に関して、それは簡単にできるものでない。これから、簡単に説明する合金設計なるものが、設計とは言えないというご意見もあるかもしれない。なお、Ni基超耐熱合金については、二つのプロジェクトで類似の設計手法の研究が行われたので一括して説明する。

NiにAlその他の各種元素（Cr, Mo, W, Taなど）を添加していくと、Niの結晶に各種元素が原子状に分散した（固溶という）ガンマ相とNi₃Alという結晶に各種元素が固溶したガンマプライム相の2相状態になる。この2相状態の合金の高温強度が大きいことが知られている。それぞれの相の組成と量を適切に設計したい。単にNiに各種元素を添加しても、相の量比や組成がどうなるかわからない。また、やたらに各元素を添加すると、生成してほしくない有害な結晶が生じることになる。

実際の合金の中に混在するガンマ相とガンマプライム相は化学的に平衡状態にあり、独立して設定はできない。説明しにくい、実際の複雑な合金の中にガンマ相とガンマプライム相が混在する場合、そのガンマ相の組成

（Ni, Al, Cr等）はガンマプライムを生成する限界の組成になっている。その限界のAlの濃度はガンマ相中のNiとAl以外の元素の濃度の関数となっているはずである。この組成は多次元空間を想像するとある面になっているので、ガンマプライム面と呼ぶこととした。このガンマプライム面の上には無数のガンマプライム相の組成が存在し得るし、またそれ等に対応して平衡状態にあるガンマ相の組成がある。この平衡するガンマ相とガンマプライム相中の各元素の濃度の比を分配比と呼ぶ。

さて、ここから先は、実際のNi基合金中に存在するガンマ相とガンマプライム相の組成の分析データを集め、統計処理することになる。重回帰分析という手法で、上記の各元素の分配比とガンマプライムの組成の関係式、その他の多くの実験式が得られ、合金設計プログラムに組み込まれた。有害な相の出ない範囲でガンマ相，ガンマプライム相の組成の組み合わせとその量比を変えて実験が繰り返され、それがさらに、設計プログラムに組み込まれた。

ガンマ相とガンマプライム相の結晶は類似しており、また、結晶の寸法（格子定数）も似ているが、その微妙な差が合金の特性に大きく影響するので、その差も計算プログラムでの評価の対象にされた。

細かい話で、合金を使用する人達には余り関係がないことであるが、格子定数の影響について少し述べよう。Ni基合金の場合、ガンマ相もガンマプライム相も類似の構造をしていて格子定数も近似している。高温（1300℃程度）でガンマプライム相を一旦ガンマ相に固溶させ、900℃程度に再加熱すると、小さなサイコロ状にガンマプライムがガンマ相の中に析出してくる。そのサイコロ状のガンマプライムは、ガンマ相の中になんて整然と並んだ状態となる。つまり、タービン翼を形成する一つの単結晶のガンマ相の中に無数のガンマプライム相のサイコロの結晶（1辺が0.5ミクロン程度）が、かなり整然と分散した状態となる。原子レベルでのガンマ相とガンマプライム相の構造は類似し、かつ、寸法（格子定数）もほとんど同じであるが、合金成分により微妙な差がある。この微妙な差は、格子定数のミスマッチと言われ、合金強度に影響するので、合金設計のプログラム中で評価され、合金選択の一つの基準にされた。合金に高温で引っ張り応力が加わると、無数のサイコロ状のガンマプライムの結晶が引っ張り応力に垂直な向きに長く成長する（図2参照）。これを、raftingと呼ぶ。raftとは筏のことで、無数の筏状のガンマプライム相の結晶が生成し、合金の高温強度を向上させる。このraftingの生成はかなり急速に起こり、その後の材料の変形を抑制すると考えられるが、この生成速度が、格子定数のミスマッチと関係があるので、合金設計でその値を評価しているわけである。

平衡して存在するガンマ相の組成とガンマプライム相の組成の組み合わせの数は無数にあり、しかも、それぞ

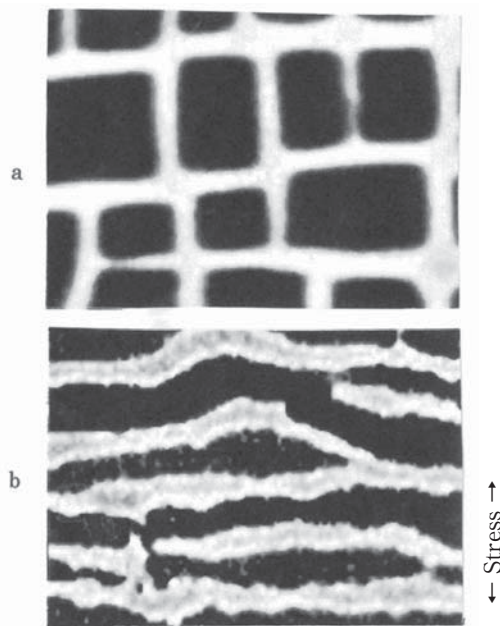


Fig. 2 Rafting of gamma-prime precipitates in Ni-base single crystal superalloy (light area:gamma phase, dark area:gamma-prime phase)

a: as heat-treated

b: after stressed at high temperature

れの組成の組み合わせに対して、二つの相の量比が自由に変えられる。つまり、2種の相の組成を変えないで、相の量比を変えられるので、強度特性の評価の結果の理解が容易になる。単に、添加元素の量を変化させる実験では実験量が膨大になり、かつ、ガンマ相とガンマプライム相の組成も量比もランダムに変化してしまうので、結果の理解と改良が困難である。

このプログラムを改変して、合金の全体組成が与えられた時、合金の内部で、相の量と組成がどの様に変化するのか計算できるので、合金組成のバラツキが合金特性に及ぼす影響も評価できる。この反対方向の計算では、多元連立方程式を解くことになる（注参照）。

ガスタービンのプロジェクトでは、普通铸造合金と一方向凝固柱状晶合金を扱ったが、これらには少量の炭化物とホウ化物が意図的に存在している。合金設計プログラムでは、与えられた合金組成に対して、平衡状態で存在する、炭化物とほう化物の組成を計算できる実験式も組み込まれている。

高性能結晶制御合金では、超塑性を示すNi基合金、粒子分散型Ni基合金も研究されたが、基本的には、上記の合金設計のプログラムによって合金組成が決定された。

（注）この分解計算でも、従来は大型コンピュータを用いた。筆者は、最近、この計算がExcelのSolverでもできることを確認した。この際用いたデータは、文献⁽⁷⁾に示されているものである。下記のTi合金でも、 α 相と β 相への分解計算がExcelのSolverを用いてできると考えている。

6. 合金設計 (Ti合金)

Ti合金の場合も、超塑性を得るには結晶の粒が細かく分散している多結晶材が必要であり、かつ、高強度を得るため、Ni基合金の場合と同じように、2相（ α 相、 β 相）合金が研究された。2相の平衡関係について、上記のNi基合金と類似の手法が開発された。これにより、平衡する両相それぞれの組成と相の量比を独立に決定できるようになった。つまり、両相の組成を変えないで、相の量比を変化させ、超塑性や強度に最適な相の量の割合を見出すことが出来るようになり、最適な合金組成が見出しやすくなる。Ti合金では、添加元素について β -formerと言う表現が今も使用されるが、これは曖昧な表現である。つまり、各添加元素には、 β 相の量を増減させる効果と、 β 相の組成（従って、平衡関係にある α 相の組成）を変化させる効果がある。我々の手法では、この二つを分離して、独立に調整していることになる。

なお、本プロジェクトの合金設計では、各合金の強度等に数値目標が設定されていた。Ti合金を含め、全ての目標の数値が達成されたと記憶している。

7. 単結晶タービン翼の製造技術

大同特殊鋼は、前回プロジェクトに続いて、単結晶用のメルティングストックの製造研究を行った。

一方向凝固柱状晶の場合より、単結晶合金翼の製造時には casting 型と中子は長時間（30分程度）高温の溶融合金に晒される。 casting 型と中子に変形したり、破壊したりしないようにせねばならない。名古屋工業技術研究所はセラミックモールドの材質の研究を担当した。

単結晶翼の製造の際、 casting 型の底部で発生した、複数の柱状晶から一本を選択し、それを単結晶に成長させるが、そのため、 casting 型の底部に、複雑形状の細い通路が設けられる。その形状など、単結晶翼の製造研究が、石川島播磨重工、日立製作所、日立金属の各社が分担して行われた。

8. 超塑性について (Ni基合金, Ti基合金)

通常の金属材料は細かい結晶の集合体であるが、結晶粒が非常に細かくなると、大きな延性を示すようになる（特に、高温で）。このような状況では材料が超塑性を示すと表現され、塑性変形で複雑な形状の部品を製造できる。

本プロジェクトでは、ガスタービンのタービンディスク（翼なし）の製造を目的としてNi基の超耐熱合金を、また、ジェットエンジンのコンプレッサーの翼付一体ディスクの製造を目的として、Ti合金の超塑性加工が研究された。

Ni基合金、Ti合金の両方に関し、金属材料技術研究所で合金設計された合金を用いて製造研究が行われた。

Ti合金では、溶解+圧延材で超塑性を示したが、複雑で大型の部材の加工のためには、粉末冶金の手法が必用と考えられた。高ガンマプライムのNi基合金では、溶解材の塑性加工が出来ないので、試験片レベルの研究で

あっても、粉末冶金で製造しないと超塑性状態にはならない。従って、両合金に関して、粉末の製造法が研究された。

Ni基合金の粉末の製造は大同特殊鋼が担当した。回転ディスクに溶融合金を滴下しつつ液体ヘリウムで急冷する遠心噴霧法が研究された。

製造されたNi基合金粉末を用い、タービンディスクの超塑性鍛造の研究が神戸製鋼により行われた。図3⁽³⁾は超塑性鍛造したままのディスクの外観、図4⁽³⁾はそれを機械加工して作成した回転試験用のディスクである（開発合金使用）。

Ti合金の粉末製造と超塑性鍛造は三菱金属が担当した。粉末製造には回転電極法が研究された。ピレット（合金の棒）を高速回転させながら、棒の端面をプラズマビームで溶解する。この合金粉末を静水圧処理で単純な形状にし（プリフォーム）、型に入れ、高温で時間をかけて超塑性変形により製品を製造する。図5⁽³⁾は、超塑性鍛造で直接製造された、外径400mmの翼付ディスクである。



Fig. 3 Superalloy turbine disc as forged superplastically, using powdered alloy after HIPing (diameter : 340mm)

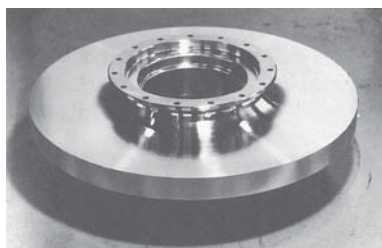


Fig. 4 The same as Fig. 3, after machining, to be rotation-tested

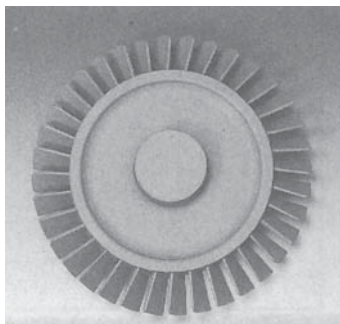


Fig. 5 Ti alloy compressor disk with blades, made by superplastic forging of compacted alloy powder (diameter: 400mm)

9. 粒子分散強化Ni基合金について

常温で使用される合金の強化には時効処理（中程度の高温）による微細粒子の析出（固体から別の固体が生成すること）による析出硬化処理が利用できるが、高温で使用すると析出した粒子が粗大化して軟化する。そこで、粗大化しにくい酸化物微粒子の分散による強化が色々研究されて来た。

Ni基合金ではプロセスが複雑で複雑形状の製品にするのが難しい。ガンマ相とガンマプライム相の他、安定な酸化物であるイットリアを細かく分散させる。プロジェクトでは我々の合金設計によるNi基合金をベースに、Benjaminという人が考案した機械的合金化法で実験が展開された。いくつか論文を出した後に、Benjaminが所属する会社（International Nickel Co.）から、わざわざ日本まで3人ぐらいの関係者が訪問され、International Nickel Co.では、この合金に力を入れており、その点配慮してもらいたいと言われた。研究するなどまでは言わなかったと思う。実は、Benjamin氏はMITで私と同じ研究室に2年間いてよく知っている人である。先方は日本での研究のリーダーが私とは気が付かなかったのである。そこで、こちらからも言い出せず放置することとなった次第である。幸か不幸か、この件に関して、商業的な問題が起きるまでに至らなかった。

機械的合金化では、各種金属粉と微細酸化物粉を強力なボールミルで強制的に合金化させる。その後、処理粉をシース（鉄パイプ）に封じ込め、高温で押し出し加工して合金棒とする。

問題は、このままでは高温強度が出ないことである。押し出し後、一方向再結晶と言う微妙な処理で、押し出し材中に細長い結晶を成長させねばならない。

押し出しと一方向性再結晶は単純な棒状の試験片では可能だが、タービン翼の形状では困難であった。図6⁽³⁾は当プロジェクトで努力の結果、タービン翼に近い形状で一方向再結晶に成功したものである（開発合金使用）。余りははっきりしないが、軸方向に伸びた結晶が見える。

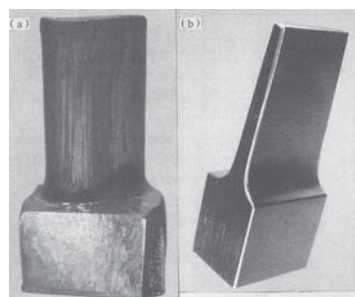


Fig. 6 Blade-like piece of ODS-Ni-base superalloy, made by mechanical alloying and directional recrystallization

10. 終わりに

私の退職後、何人かの後継者により、物質・材料研究機構で、超耐熱合金の仕事が継続された。特に、原田広史氏（本原稿執筆提案者）が大活躍した。彼は、前記の二つの国家プロジェクトで主要な任務を果たした後、さらに、英国ケンブリッジ大との共同研究（研究実施場所はケンブリッジ大、日本から研究者が赴任）を提案した。これは、元・新技術事業団によるもので、私が日本側の研究代表者ではあったが、原田氏が実質的に主導したものである。この共同研究の中でも、耐熱合金に関する基礎的な研究が続行された。

さらに原田氏は、筆者の退職後、超耐熱合金のプロジェク研究を続行した。その中で、特筆すべきこととして、英国の航空機エンジンのメーカーであるロールス・ロイス社と共同研究を行い、同社の予算で物質・材料研究機構内に超耐熱合金の研究拠点を作った。その成果は、ボーイング787用の同社のエンジンのブレードに活かされている。また、発電用1700℃ガスタービンへの単結晶超合金の適用も期待されている。⁽⁴⁾

新しい材料の実用化のハードルが高い。特に、高温長時間の過酷な条件下では、材料の特性の劣化の予測がむずかしい。過酷な条件下で使用される新材料の採用には心配がつきものであるが、産業界においては、新材料の採用に積極的な姿勢をとってもらいたいと考えている。高効率ガスタービンと高性能結晶制御合金の両プロジェクトにおいて、上記の民間各社の研究は工業技術院からの委託研究で行われた。それらの研究は、製造技術の研究開発に関するものであり、合金成分を決める合金設計は金属材料技術研究所が分担した。各社は製造技術の研究を行うとともに、金属材料技術研究所からの発注により、鋳型や試験片の製造を行った。このような民間からの協力がなければ、合金設計やそれによる合金開発はできなかったと考えられる。

Ni基超合金の合金設計の手法はほぼ完成されたと考えられる。今後、大幅な、合金の改良は余り望めないのではないかと考えている。それは、合金設計技術が完成したからともいえるわけで、複雑な気持ちである。しかし、この合金設計技術は合金の成分が変動したりした時の事故防止など、合金の信頼性保持のために活躍するであろう。また、Ni基合金には、色々な高価な添加元素が用い

られているのでその添加量を下げたり、また、ある元素が入り手困難になり合金を設計し直す様な時に用い得ると考えられる。

Thermal Barrier Coating (TBC) の改良が進んでいるようである。合金とCoating材の相性を、開発された合金設計を援用して検討することも有効でないだろうか。

なお、両プロジェクトを通じ、多くの研究論文が発表されたが、合金設計に関する主要発表論文を文献^{(5)~(8)}に示しておく。

11. 参考文献

- (1) ムーンライト計画：高効率ガスタービンの研究開発における「耐熱合金の研究開発」－最終成果報告書、昭和60年3月、科学技術庁金属材料技術研究所。
- (2) 次世代産業基盤技術研究開発制度の「高性能結晶制御合金の研究開発」における「合金設計技術」－最終成果報告書一、平成元年3月、科学技術庁金属材料技術研究所。
- (3) 山崎道夫、高性能結晶制御合金ハンドブック（1991）、日本規格協会。
- (4) 原田広史、横川忠晴、川岸京子、小林敏治、小泉裕、坂本正雄、湯山道也、高温タービン用耐熱材料と実機適用：使われる材料の開発を目指して、日本ガスタービン学会誌、Vol. 43, No. 5, (2015), pp. 349-356.
- (5) Harada, H., Yamazaki, M., Koizumi, Y., Sakuma, N., Furuya, N., Kamiya, H., Alloy Design for Nickel-Base Superalloys, Proceedings of a Conference "High Temperature Alloys for Gas Turbines 1982", held in Liege, Belgium, Oct. 1982, D. Reidel Publishing Co. p. 712.
- (6) Yamagata, T., Harada, H., Nakazawa, S., Yamazaki, M., Nakagawa, Y.G., Alloy Design for High Strength Nickel-Base Single Crystal Alloy, SUPERALLOYS 1984, Proceedings of the Fifth International Symposium on Superalloys, ASM.
- (7) Harada, H., Ohno, K., Yamagata, T., Yokokawa, T., Yamazaki, M., Phase Calculation and its Use in Alloy Design Program for Nickel-Base Superalloys, SUPERALLOYS 1988, Proceedings of the Sixth International Symposium on Superalloys, ASM.
- (8) Onodera, H., Ro, Y., Yamagata, T., Yamazaki, M., Design of Titanium Alloys, Proc. of Fifth International Conf. on Titanium (1984), p. 1883.



ハイポニカ農法に学ぶ Lessons from Hyponica Method

仲俣 千由紀^{*1}

NAKAMATA Chiyuki

トマトが大木になる、1本のトマトに大量の実がなる、そんな話を見聞きしたことはないでしょうか？1985年のつくば万博に13000個の実をつけたトマトが展示された事をご記憶の方もいらっしゃると思います。通常、トマトは一粒の種から芽が出た苗に50～60個の実をつけるそうですが、「ハイポニカ農法」という方法で育てたトマトは木のように大きく育ち、なんと10000個超の実をつけるまでに育つそうです。種には何の仕掛けもなく、育て方を変えるだけで大量の実をつけるスーパートマトが育つというのですから驚きです。このスーパートマトは実を多くつけるだけではなく、病気に対する抵抗力が強いという特徴もあるそうで、向かうところ敵なしのまさにスーパーなトマトのようです。

このハイポニカ農法は、植物の成長のカギは栄養を吸収する「根」にあると考えた野澤重雄先生によって開発された農法で、根の成長に最適な環境を考え、成長を阻害する要因を排除していった結果、たどり着いた農法だそうです。ハイポニカ農法には大きく2つの特徴があるそうです。特徴(1)土は根の成長の抵抗になるため土を使うのをやめる。特徴(2)植物はもともと環境に順応する力があるが、環境が変化するとどの状態に順応してよいかわからず順応がうまく行われないので、その要因を排除すべく、温度、肥料供給、酸素供給、養液（水）の供給を安定し、安定した環境を作る。だそうです。根の成長にもっともよい環境でストレスなく育てる農法だと言えそうです。

さて、人間に当てはめてみるとどうでしょうか？種は無限の可能性を秘めている。この種の可能性を活かすも殺すも育て方次第。この点は大いに学ぶところがあると感じます。一方、「ストレス環境を取り除いてやる」という点は、これはそのまま人間に当てはめていいとは思えません。「根が伸びるのを邪魔しない」のはいいとして、先回りして障害を取り除くのは過保護に過ぎることになりそうです。環境をコントロールしていわば「温室育ち」にすることも人間の成長にとってはいいとは思えません。人間は幼少期は別として、いずれは世間の荒波にもまれなければならないわけで、人の手で育

てられているトマトとは同じようにはいかないのでしょうかね。ストレスフリーで育ったハイポニカ人間ばかりの世界があるとすれば、そこは疑うことを知らない善良な人々の暮らすユートピアとなるのでしょうか？真偽の程はわかりません。

ハイポニカ農法の考え方を人の育成にそのまま適用するにはいささか疑問があるのを承知の上で、教訓として心に留めておきたいことを、もう少し考えたいと思います。

教訓(1)可能性を信じる。

トマトが10000個身をつけるか、50個実をつけるかは育て方次第。10000個実をつけることができる可能性を持っている、ということを疑わないことが人の育成でも大事だと思います。自分が自分を信じることも大事なのでしょうね。イチロー選手は「そんなことできるわけがない。」と言われながらそれを実現してきたそうです。イチロー選手ほどの強い自信を持てる人はなかなかいないでしょうから、育てる側の人間がまず信じ、自分への自信を育む事で、相手の可能性を引き出すことができるのでしょうかね。

教訓(2)自ら育つのを邪魔しない。

子育てを思い返すと「あれをやれ」「これをやるな」「そんなやり方ではだめだ」とそんなことをたくさん言ってきたように思います。自らやろうとする気持ちをどれだけ挫いてきたか、と思います。過保護でもだめ、放置でもだめ。見守りながら自らやろうとすることを邪魔しない。この絶妙なバランスが必要なようです。相手の個性によってもバランス点は違うそうですし、このバランスを見極める眼力を養うのは並大抵ではなさそうです。ですが、このバランスが大事であるということを常に意識しておく、ということから始めようと思います。

最後に。ハイポニカ農法とは真逆の理論に基づく永田農法なるものがあるそうです。こちらは別名スパルタ農法といわれており、植物を飢餓状態にすることで小さいが甘みの強い実が取れるそうです。苦行僧が悟りという実を实らせる、といったところでしょうか。育て方もいろいろですね。

原稿受付 2016年10月4日

*1 (株)IHI 航空宇宙事業本部 要素技術部
〒190-1297 西多摩郡瑞穂町殿ヶ谷229



学校で習わない英語 (8)

English Which Is Not Taught in School (8)

吉中 司*1
YOSHINAKA Tsukasa

－D－章

【英語】：at the end of the day, …

【意味】：「…した暁には」, 「最終的には」, 「結局は」

【説明】：この言葉, 日常会話でも会議中でもよく聞かれます。新聞の記事にも見られます。文字通り訳せば, 「その日の終わりに」でしょうが, 実際の意味合いは違います。

ここに, 二人の男が, 或る話題について討論をしているとしましょう。しかし, 時間ばかりたって結論は出てこず, 今日のところはここでオヒラキ, となりました。その時, その内の一人が, 椅子から立ち上がりながら, 言いました。「まあ, 色々考えて貰った暁には, 僕の意見を分かって呉れると思うよ」この「暁には」が, この言葉の意味合いなのです。ですから, 上の文を英語にすると, “At the end of the day, I think you will understand my point.” となるでしょう。

この言葉は, その中の “the day” が定冠詞は付いているものの確定された日でないために, 期日の決まっている場合には使えません。そういう時には, 期日の決まった “at the end of tomorrow” とか, “by the end of next Friday” とか言わねばなりません。

【英語】：back to the drawing-board

【意味】：「再考せねばならない」, 「一足元へ戻る」

【説明】：“drawing-board” とは製図板の事で, コンピューターが今日の様に大容量化・高速化される以前, 工業製品の部品や組み立ての図面を画くのに使われていた画板です。ですから, 部品製造上や製品使用中に問題が出た場合, 設計エンジニアは, いつもこの製図板に戻って問題を解決せねばなりませんでした。

今日, この言葉は, 職場や日常生活で問題が何であっても, 一歩戻らねばならない場合とか, 再考せねばならない場合に, 使われる様になりました。

では, その使用例です。ここに, 手仕事の好きな夫が, 奥さんに頼まれて, 本箱を作る事になったとしましょう。彼は奥さん特注サイズの本箱を, 買ってくる板の無駄を最小に出来るよう, 設計上, 色々工夫したのです。そして, 材料を買い, 板を切り, 組み立てに入りました。ところが, 一旦組み立ててみると, 前から見た時, どうも本箱が長方形になっていません。奥さんがそれを見て, 「アナタ, 見たところ一寸変よ。何トカしてくれなきゃ, こんなの使えない」と不満を漏らしました。これを英語で, しかも端的に言おうとすると, “It doesn't look right. I think you have to go back to the drawing-board, my dear.” で意味が通じます。

原稿受付 2016年9月5日

*1 独立コンサルタント

－E－章

【英語】：play by ear

【意味】：「楽譜なしで演奏する」, 「状況に任せる」

【説明】：この言葉には, 二つの意味があります。一つは, 単語から推測がつくように, 耳だけで音楽を覚え演奏する, という意味です。「あいつ, 楽譜読めなくせにピアノを弾けるんだ」と言う場合, “He can play the piano by ear.” で良いのです。

もう一つの意味は, 一寸ゲスしにくいです。オフィスでの同僚二人 (AとB) が, 次の週末に近くの山に登る事を相談していたとしましょう。しかし, Aの仕事が計画通り進まないうちに, 木曜日になってしまいました。そこで, Bが「どうだい。週末, 行けそうかい」とAに尋ねたところ, Aから「うむ。今のところ, 何とも言えないよ」と言う返事が返ってきました。そこでBは, Aの状況を理解し, 「それじゃ君の仕事の進行次第にしよう」との妥協案を出しました。これを英語で話すと, “Then, let's play it by ear.” だけで済むのです。非常に便利な言葉です。

ただ, 便利ではありますが, 最終的に, いつどこで決定するのか, は不明ですので, フォロー・アップの必要があります。

【英語】：a pineapple express

【意味】：「北米太平洋沿岸での秋から冬にかけての連日豪雨豪雪」

【説明】：これは, 生産地から大きな消費地へ新鮮なパイナップルを輸送する急行貨物列車か, と考えられるのですが, そうではありません。

日本の台風や北米のハリケーンと同じ気象現象が, 日本の遙か南東でも発生します。ニューギニアの北, フィリピンのあるフィリピン海辺りです。この大型低気圧で秋から冬にかけて発生したものが, 停滞したジェット気流に沿って北東に進み, 太平洋を渡って北米太平洋岸に到着する場合, パイナップルの産地ハワイ諸島を通過しますので, この名前が付けられています。この気象現象の特長は, 湿気の非常に高い事と, 連続性を持っている事です。これが太平洋沿岸付近では豪雨, 山地では大雪を降らす事になります (参考資料9)。

かつては, この大型低気圧, アメリカ本土から見ればハワイ諸島付近から来るために, “a Hawaiian storm” とも呼ばれていた時もありました。

参考資料 (参考資料は本連載を通した番号で示しています)

9. en.wikipedia.org/wiki/Pineapple_express

調査研究委員会活動報告

NEDOプロジェクト『再生可能エネルギー大量導入時代の 系統安定化対応先進ガスタービン発電設備の研究開発』について

調査研究委員会

1. はじめに

当学会のガスタービンを考える会および産官学連携委員会の活動が発端となって、NEDOの「エネルギー・環境新技術先導プログラム」の中で「再生可能エネルギー大量導入時代の系統安定化対応先進ガスタービン発電設備の研究開発」プロジェクトが実現したことは、これまで学会誌や定期講演会でお伝えして来たところである。この1年間の調査研究プロジェクトは2015年度に参加各機関で順調に実施され、2016年2月に無事完了した。実施に当たっては産官学連携委員会が臨時委員会として調査研究委員会を組織し、プロジェクトの契約先である各社・各機関からメンバーが出て研究を遂行した。また、NEDOの委員会として研究開発推進委員会が設置されたが、ここでは調査研究委員会のメンバーに、電力5社および電事連から委員が参加し、ユーザの意見を取り入れながら研究を進めた。

この調査研究プロジェクトでは、今後の再生可能エネルギーの大量導入において必須となる系統安定に貢献する技術として、起動性・負荷追従性に優れ、繰り返し負荷に耐えるガスタービンの実現に向けた研究開発の課題を明確化することを目的に、早急に着手すべき課題として以下の5項目を取り上げて調査検討を行い、その成果から2030年において開発すべきガスタービンの性能目標をとりまとめた。(カッコ内は実施機関)

- (1)急速負荷変動のガスタービンプラントへの影響検討・評価(電中研, 産総研, 東大, 京大)
- (2)負荷変動を吸収するもしくは負荷変動に対するマージンを拡大する技術(三菱重工, MHPS, 東大)
- (3)負荷変動に急速に追従する技術, 急速起動を可能にする技術(IHI)
- (4)負荷変動を予測して発電量を変化させる技術(川崎重工)
- (5)過渡応答, 繰り返し負荷による材料劣化への対応技術(東芝, 長岡技科大, 首都大学東京, 物材機構)

また、技術開発と普及を図るために進めるべき事項として、開発したガスタービンを活用した事業が成立できるような制度(例えば容量市場等)の整備, 系統連系実証を可能とする運転検証特区の設立, 国内に限らずアジア地域やアフリカ地域を主市場と捉えた市場開拓など, 直接の技術開発ではない様々な検討の必要性についても整理した。

調査研究委員会では成果報告書を取りまとめて4月に

NEDOに提出し、6月に事後評価ヒアリングを受けて事業が完了した。成果報告書はNEDOのホームページに掲載されており、閲覧が可能である(http://www.nedo.go.jp/library/database_index.html, データベースで管理番号: 2016000000495)。本報告では上記の各実施項目について、成果の概略を紹介する。

今回のプロジェクトの成果を踏まえ、産官学連携委員会, 調査研究委員会, およびガスタービンを考える会では、負荷変動対応型ガスタービンの調査研究を継続し、近い将来の大型プロジェクト実現を目指して実施案を検討している。引き続きご協力をいただけると幸いです。

(渡辺紀徳, 壹岐典彦)

2. プロジェクトの意義

2.1 太陽光発電導入に関する国の方針と現状

2015年7月に発表された長期エネルギー需給見通しでは、2030年の電源構成における太陽光発電の割合が発電電力量で7%(749億kWh)と示された。太陽光発電は夜間発電しないこと、天候により発電量が左右されることから、利用率は13%程度に留まる。すなわち、発電電力量7%を実現するためには、ガス火力とほぼ等しい膨大な設備容量(6,400万kW程度、全設備容量の1/4程度)が必要になる(図1)。

太陽光発電設備の導入は着実に進んでいる。2014年10月末現在における太陽光発電の接続済量は1,849万kWとなり、接続申込量については5,011万kWと設備容量目標の3/4に達し、各電力会社管内の「出力抑制30日ルール

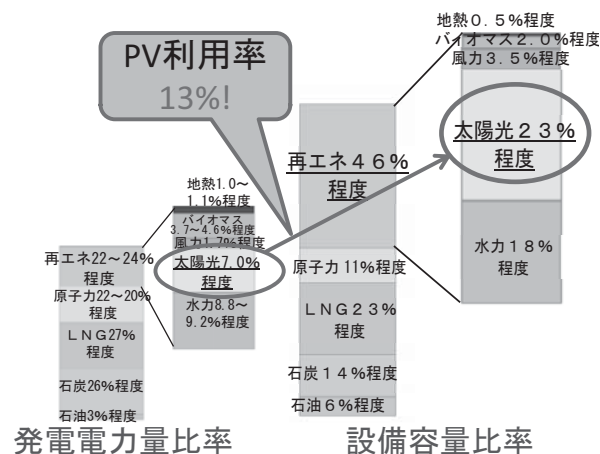


Fig. 1 長期エネルギー需給見通しによる2030年度の電力需要と電源構成⁽¹⁾

における接続可能量」を既に超えている地域もある（図2）。さらに、認定量については7,077万kWと、目標となる設備容量を超過している。

2.2 太陽光・風力発電大量導入時に予想される影響

太陽光や風力など再生可能エネルギーによる発電は、出力が自然現象に左右されるため、本質的に不安定な電源である。太陽光発電の場合、曇りと晴れが繰り返されるような天候時は、日中に急激かつ大きな出力変動が生じる（図3）。また、太陽光発電は日中しか稼働しないので、夕方から夜にかけて急激に発電量が減少する。電力系統において、これまでは電力需要の変動のみであったが、供給側での変動も生じるため、電力需給バランスに大きく影響を与えることになる。図4に、東北地域に7GW（700万kW）太陽光発電と9GW（900万kW）風力発電の導入を想定した、春季（4～5月）の残余需要（電力需要から太陽光・風力の発電出力を差し引いた量）の変動シミュレーション結果を示す。仮にこれだけの太陽光・風力発電が導入された場合の残余需要は、本来の需要変動に比べ非常に大きくなり、1日の中で800万kWもの変動が生じることが示されている。影響予測については、火力原子力発電協会、電気事業連合会、電気学会等からも報告されている。また、実系統においては、既に潮流の変化や火力発電所の運用方法などに影響が生じ始めている。

2.3 電力系統安定化のための先進ガスタービン発電設備の必要性

太陽光発電導入による電力系統への影響を補完するため、設備容量の大容量かつ急速起動・高速負荷応答の性能を有する電力供給手段が必要になる。そのため、負荷変動を吸収する様々なエネルギー貯蔵技術の研究開発が行われており、それらはそれぞれの特性に応じて適切に使い分けなければならない。蓄電池は、大容量化を図るにはコスト高で、連続した大出力は期待できないため、その適用は周波数変動などの秒・分オーダーの事象への対応に限られる。現在、実対応している揚水発電は、起動性と負荷追従性に優れるが、汲み上げた水がある時だけ発電できる一次的な発電量限定の手段にすぎない。そのため、時間オーダーにおける大きな負荷変動を補完するためには、火力機がその役割を担わざるを得ない。中でも、他の火力機と比較して起動性や負荷追従性に優れるガスタービンの活用は有望である（表1）。負荷変化速度に優れる、航空機用のジェットエンジンを発電用に改良した航空転用GTが既に市場投入されているが、出力が小さいため多数設置する必要があるほか、天然ガス焚き乾式低NO_x燃焼器の適用実績が少ないため技術開発が必要となるなど、課題も多い。よって、揚水発電並みの容量を持つガスタービン複合発電設備が、唯一そのポテンシャルを持つと考えられる。

2.4 ガスタービン発電設備の運用性向上に関する海外での開発動向と導入メリット

海外でも再生可能エネルギーの導入量拡大に伴う電力系統の安定化のため高速起動GTCCの開発が進められており、FLEXIBLE OPERATION対応を謳って開発が加速している。公開されている情報では、起動時間30分以下、負荷変化率10%/分程度の製品が商用化されている。このようなガスタービンを導入することで、系統安定への貢献に加え、高効率かつ燃料がLNGであるためCO₂、NO_x、SO_xなど環境影響物質の排出量の抑制が可能である。また、起動時間短縮に伴う起動時における燃料費削減も期待できる。

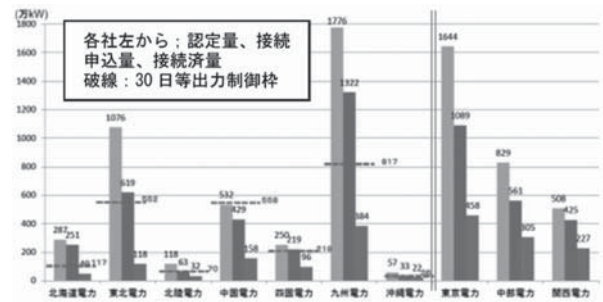


Fig. 2 各電力会社管内の認定量、接続申込量、接続済量と接続可能量⁽²⁾

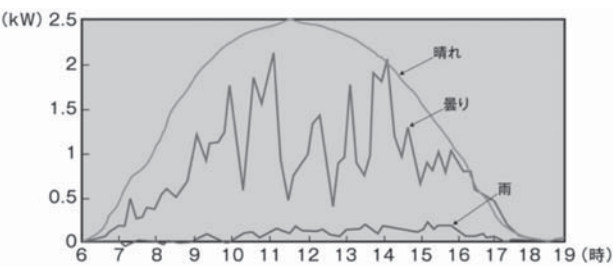


Fig. 3 太陽光発電の天候による変化⁽³⁾

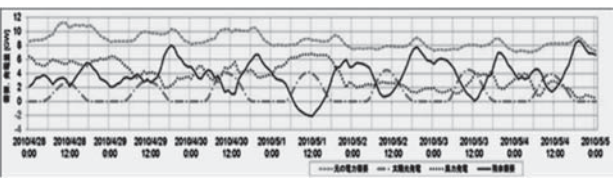


Fig. 4 太陽光・風力発電が大量に導入された場合の残余需要（東北地域）⁽⁴⁾

Table 1 各種火力発電設備の現状での運用性比較

	大型GT	GTCC	ガス火力	微粉炭
起動時間				
点火～全負荷	30分	60分	3時間	3時間
ホットスタート				
負荷変化率 (50-100%負荷)	10%/分	5%/分	約5%	3%
最低負荷	-	45%	20%	20%

2.5 ガスタービン発電設備の市場性

我が国のガスタービン技術は、現時点で世界（GE、シーメンス）と勝負できる技術レベルとシェアを有している。提案する本技術開発により更なる技術力の向上を図り、世界レベルを維持・強化することは国内の産業技術成長戦略として重要である。今後25年間に於いて1,450GWのガス火力の新設が見込まれており、ガスタービンの世界市場は150兆円規模と予想されている（図5）。国内に限らず、特に更なる発展が見込まれるアジア地域を主市場と捉えた海外展開が大いに期待できる。

2.6 まとめ

気象条件や時間によって出力の変動が大きい太陽光・風力発電の大量導入時代において、電力システムの安定性を保つにはそれを吸収するための新たな技術開発や制度設計が必要である。火力発電設備は出力だけでなく、周波数や電圧等の調整のためにも不可欠な電源である。特にガスタービン発電設備は熱効率がよく、起動速度や負荷変化速度に優れている。その機動性をさらに向上することにより、急激な天候変動や日没前後の需給バランスの急変を補完し、電力システムの安定性維持に貢献できるだけでなく、再エネの導入促進ひいてはCO₂排出量削減を実現することができる。

海外でも機動性を向上させたガスタービンの開発が進められている状況にあり、今後の国内における電力システム安定化ならびに国際競争力強化のためには、機動性能の高いガスタービン発電設備の研究開発が急務である。

（渡辺和徳）

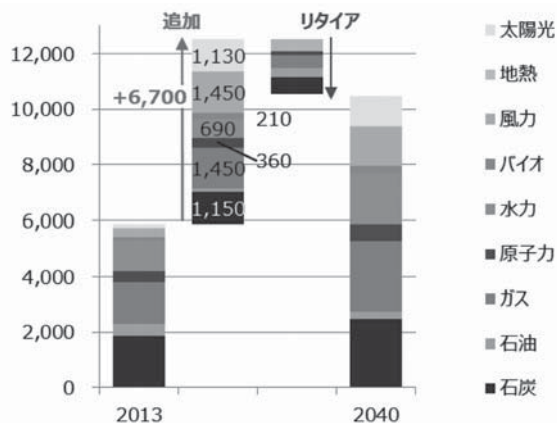


Fig. 5 2040年までのエネルギー源別の発電設備導入見通し
(World Energy Outlook 2015を基に作成)

3. 実施概要

再生可能エネルギーの大量導入に伴い生じる電力システムにおける急激な負荷変動への対応は、定格負荷で最高効率を誇るピンポイントでの性能から、様々な状況に柔軟に対応できる運用性を向上させた状態での性能を重視するという設計思想の転換になるため、多くの技術課題が生じる。本研究では、長時間の定格運転を前提とし、熱効率の向上を狙ってきたこれまでのガスタービン発電設備の技術を基盤としつつも単純にその延長線ではなく、起動性や負荷追従性を重視し、過渡応答性に優れ、繰返し負荷に耐えるガスタービン発電設備の実現に向けて、解決すべき課題や開発課題の明確化を行った。研究を計画的かつ効率的に推進するため、図6に示した再委託先を含む実施者側12機関、ならびにガスタービンユーザー側より電気事業者6機関による24名から構成される、研究開発推進委員会を組織し、4回開催した。

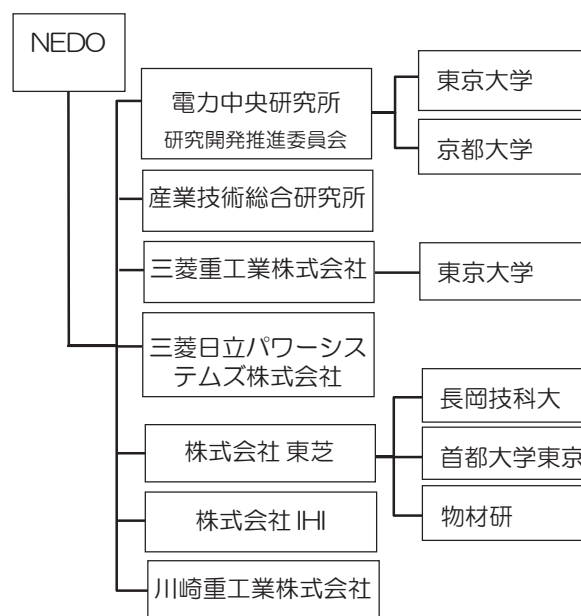


Fig. 6 プロジェクト実施体制図

4. 研究成果

4.1 急速負荷変動のガスタービンプラントへの影響評価

4.1.1 緒言 本実施項目では、急激な負荷変動および周波数変動に対応できるガスタービン発電設備の開発項目の明確化に資するため、いくつかの負荷変動パターンおよび周波数変動パターンに対し、プラント動特性解析によるケーススタディを行い、ガスタービン発電設備の燃料バルブや圧縮機入口案内翼などの急激な変化による設備内各部の温度や圧力、空燃比など変化を解析した。以下にその概要を示す。

4.1.2 解析モデル構成 今回の解析対象は、20万kW級一軸型ガスタービンコンバインドサイクル（GTCC）を想定した。全体モデルは、大きく、ガスタービン系、蒸気タービン系、プラント制御系からなり、さらに各系

は構成要素の動特性機器モデルや制御器モデルで構成した。ガスタービン系のモデル構成と計算項目を図7に示す。

発電プラントのような複数の機器により構成されるシステムの動特性解析モデルにおいては、作動流体の温度（エンタルピ）と圧力を算出する点をノードとにおいて、ノードと機器特性を計算するモデルを組み合わせることで全体システムのモデルを構築した。機器モデルにおいては、機器特性式やエネルギー・質量保存則から導かれる収支式から、作動流体のガスおよび水・蒸気の流量、温度、圧力の動特性を計算した。

微分方程式による数式モデルを積分計算し、解を得るためには解析ツールが必要となる。（一財）電力中央研究所では、Modelica言語による物理系複合モデリング・シミュレーションツールDymolaをベースに火力発電システムに必要な動特性機器モデル、制御系モデルを開発し、また、プラント内の作動流体であるガス、水・蒸気の温度（エンタルピ）や圧力等の計算を行うための物性計算関数群を実装して、図8に示すような火力発電システム動特性解析ツールの構築を進めている⁽⁵⁾。本ツールでは、開発した機器モデル等をGUIを用いて組み合わせることで、柔軟にシステム全体モデルの作成や条件設定ができ、また、系統図に近い形でシステム構成を表現できる。このツールを用いて、解析対象GTCCシステムの全体のシミュレーションモデルを構築し、機器仕様を設定して各種条件下での動特性解析を行った。

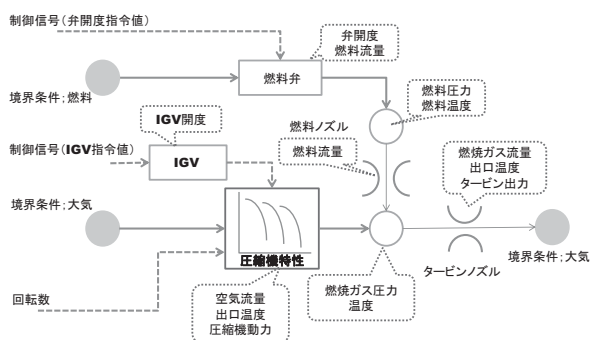


Fig. 7 ガスタービン系モデル構成の概念図と計算項目

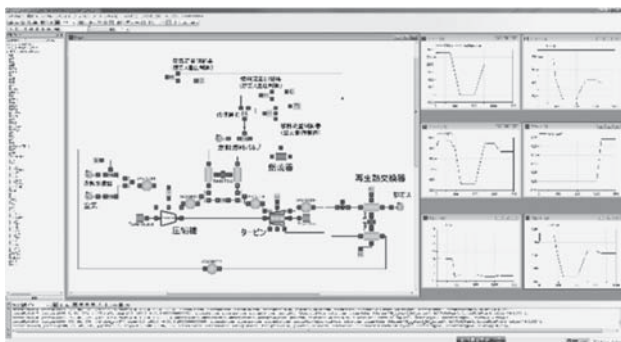


Fig. 8 動特性解析ツールの実行画面⁽⁵⁾

4.1.3 動特性解析結果 今回のシミュレーションでは、以下三点について検討した。

- ・周波数変動に対する応答
- ・負荷変化率向上時の影響
- ・起動時間短縮時の影響

周波数変動が生じた際、汽力発電プラントではボイラにおける保有水の熱容量が大きいので、周波数低下時にはそれがバッファとして作用し、タービン加減弁開度の増加により蒸気タービンへの蒸気流量増加を行うことで発電機出力を増加することができる。しかしながら、GTCCプラントで即応できるのはガスタービンの出力応動であり、その出力は燃料流量と空気流量により制御される。その際、ガスタービン内での温度や圧力の急変が懸念される。

一方、負荷変化について、ガスタービンの燃料流量変化による出力応動は非常に速いが、蒸気タービンは通常運転時には加減弁による出力制御を行わないため、排熱回収ボイラ（HRSG）からの発生蒸気流量にほぼ比例した出力となる。蒸気条件の変化はガスタービン出口ガス（排ガス）温度変化に伴うが、HRSGの熱容量などにより応答が遅れ、燃料流量の変化から蒸気条件や蒸気タービン出力が変化するまで遅れが生じると考えられる。そこで、負荷変化率向上の際のそれら挙動を見ることとした。

さらに、プラント起動時には、上記の負荷変化時の挙動に加え、負荷上昇途中に蒸気タービン系で弁の切り替えがあるためその影響や、切り替えタイミング・開度速度の違いによる影響についても解析する必要があると考えた。そこで、上記三点について検討を行った。

解析結果の一例として、周波数が5秒間で1%上昇（60Hz→60.6Hz）した場合の解析結果を図9に示す。急激な周波数変動が生じた場合、急激な出力低下と共に、急激な燃焼温度低下が生じることが分かる。これは、主に出力を制御する燃料弁とガス温度を制御する圧縮機入口案内翼の動作速度の違いにより、燃焼器内の空燃比が急激に変化して燃焼温度が急変するためである。これより、燃焼安定性を維持する技術開発や、熱疲労に耐えうる機器設計や材料評価技術の開発等が課題として挙げられる。

次に、起動時間を短縮した場合の解析結果を図10に示す。図には、現状性能として並列から定格出力まで30分の起動指令の場合と、急速起動として5分の起動指令の場合の、出力および主蒸気温度の変化特性を示す。

起動時には、ガスタービン出力が先行し排ガス温度・流量が上昇することで、主蒸気温度・流量が上昇して蒸気タービン出力が発生する。蒸気タービンの出力変化は遅いがガスタービン出力で補われるため、30分起動指令の場合ではプラント出力としては出力指令に追従できている。一方、5分起動とした場合、ガスタービンを急速に負荷上昇することで追従するが、途中ガスター

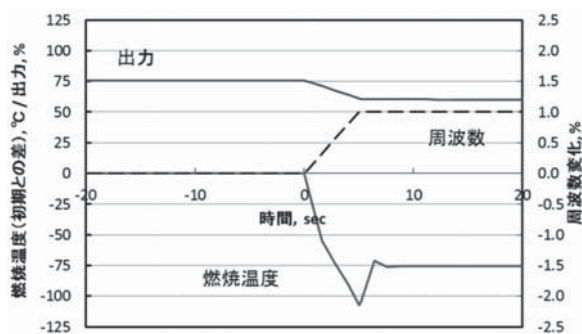


Fig. 9 周波数変化に対する出力・燃焼温度変化 (1%上昇時)

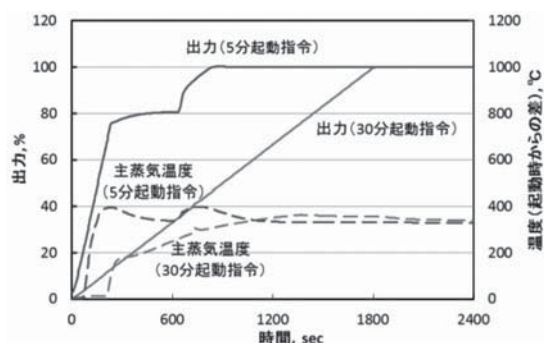


Fig.10 各起動指令による出力変化および主蒸気温度変化

ビン出力が上限値（燃料流量の上限値）に達する。蒸気の温度・流量の上昇も30分起動時に比べ速いが、蒸気タービン出力の上昇が追いつかず、負荷指令にプラント出力が追従できなくなることが分かる。

HRSGや蒸気タービン等の蒸気タービン系設備においては、起動指令直後から主蒸気温度が急激に上昇している。HRSGでは急激な圧力上昇や蒸発ドラム内水位の変動を伴うことも見られた。したがって、蒸気タービン系設備に対する温度・圧力等の急変に対応する技術開発も重要な課題として挙げられる。

4.1.4 まとめ 本実施項目においては、GTCCの動特性シミュレーションモデルを構築し、周波数変動に対する応答、負荷変化率向上時の影響、起動時間短縮時の影響を解析した。

これら結果から、燃焼安定性を維持する技術開発や圧縮機入口案内翼の作動速度向上技術、熱疲労に耐えうる機器設計や材料評価技術の開発等が課題として挙げられた。また、急速な起動の場合、蒸気タービン系設備において、主蒸気温度の急激な上昇や圧力上昇、蒸発ドラム内水位の変動などが見られた。蒸気タービン系設備に対する温度・圧力等の急変に対応する技術開発も重要な課題として挙げられた。

(高橋徹)

4.2 負荷変動を吸収する発電システムの検討

電力の需給ギャップに対して電力系統を安定化する様々なシステムについて負荷変動を吸収する能力を調査・検討し、負荷変動対応型先進発電設備の研究開発計画を実効性のあるものにすることを目指した。具体的

な調査検討項目は、システムの発電規模もしくは蓄エネルギーの規模、変動への応答速度・対応可能な変動範囲、開発要素、各種コスト等とし、文献調査等を基に整理を行って明確化を図った。2030年を実用化開始時期として想定して、2030年代の電力系統において、使用される可能性の高い負荷変動吸収システムについて文献調査を開始した。これらの調査、検討を介して、将来のエネルギーシステムにおける負荷変動を想定し、その負荷変動に応じて発電を行うシステムとして、どのような性能が必要かを検討する資料を提供することを目指した。その結果、以下のことがわかった。

4.2.1 将来のエネルギーシステム・電力系統に関するレビューや整備計画の調査

・日本だけでなく、海外でも負荷変動への対応について、研究開発の期待がある⁽⁶⁾⁻⁽⁹⁾。

・天然ガス火力発電が負荷変動を調整する電源として期待されている。

4.2.2 負荷変動吸収システムの調査

蓄エネルギー技術について蓄電池以外の候補として、圧縮空気貯蔵、フライホイール、キャパシター等の研究開発についてサンディア国立研究所レポート等⁽⁸⁾の資料を進めた。負荷変動吸収の方法について、以下の方法に分類して検討した。

- ①電力貯蔵（蓄電池、キャパシター）
- ②フライホイール
- ③揚水発電
- ④圧縮空気製造
- ⑤高圧ガス製造
- ⑥燃料製造（水素、シクロヘキサン、メタン、メタノール、アンモニア等）
- ⑦水蒸気発生

蓄えたエネルギーを取り出す際の、電力出力規模と時間の関係を整理したのが次の図11である⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。蓄エネルギーのシステムとして、各種蓄電池があり、種類によって電力出力規模と時間の位置づけが異なり、それらに比べて、エネルギーの出力規模大きいのは、揚水発電、次いで圧縮空気エネルギー貯蔵である。フライホイールは電力出力規模が小さめで、時間も短い。

図12のようにフライホイール、圧縮空気貯蔵ガスタービン発電（CAES）、揚水発電などが低コストで有り、一般に蓄電池はコストが高い⁽⁸⁾⁽¹⁰⁾。ただし、リチウムイオン電池、鉛電池などは低コストのもの開発されている。一方、充放電効率は蓄電池の方が高い⁽⁸⁾⁽¹¹⁾。

短時間での負荷変動を吸収する、所謂しわ取りは蓄電池、フライホイールが行い、長時間での変動をCAES、揚水発電などが分担するのが適切である。

4.2.3 負荷変動吸収機能を持つガスタービンについての調査・検討

ガスパイプラインではガスタービンによりガスポンプが駆動される場合があるため⁽¹²⁾、CAESに近いシステム

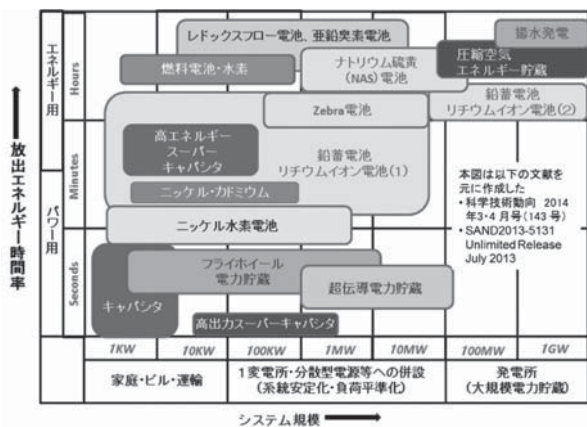


Fig.11 各種蓄電技術の位置づけ

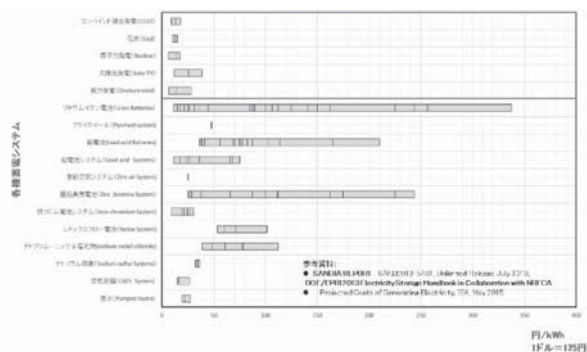
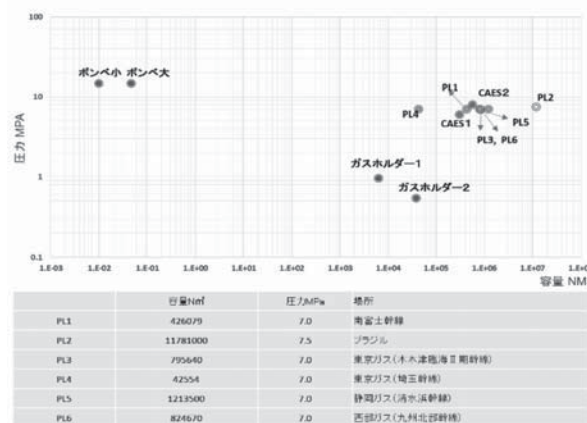
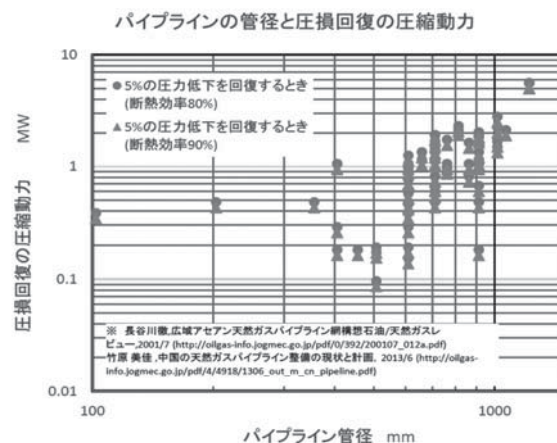


Fig.12 蓄電システムの均等化発電原価 (Levelized Cost of Electricity : LCOE)

が組める可能性がある。ガスパイプラインを圧力容器と見なした場合、CAESの検討例と同規模であり(図13)、ガスパイプラインの圧力調整の動力を負荷変動の吸収に用いた場合は、CAESと同様に動力需要のタイムシフトになるので充放電の繰り返しによる損失がない。

現在のパイプラインにおいて、年間のガス輸送量から摩擦損失を考慮して圧力を維持するのに必要な動力を推算すると、多い場合で数百kW/kmのオーダーであり(図14)、パイプラインのポンプステーションが大きな負荷変動吸収システムとなり得ることがわかった。

(壹岐典彦, 松沼孝幸)

Fig.13 ガスパイプラインの圧力容器としての規模¹²⁻¹⁷⁾Fig.14 ガスパイプラインの圧力回復動力¹⁸⁾¹⁹⁾

4.3 燃焼シミュレーション高度化

ガスタービンプラントを運用する上での大きな懸念事項の一つに、燃焼器内における火炎の失火が挙げられる。本開発事業では、過渡応答性に優れ、繰返し負荷に耐えるガスタービン発電設備の実現に向けた開発課題の明確化を目的としているが、そのような運用を行った場合、燃焼器の失火リスクは増大するものと考えられる。したがって、負荷変化時のガスタービン燃焼器内の燃焼挙動を明らかにするとともに、開発課題を明確化しておくことは、非常に重要である。そこで本研究では、詳細な化学反応機構を採用した燃焼シミュレーションを単純な系に適用し、負荷変化時の燃焼安定性や窒素酸化物排出特性に関連する物理量を評価するとともに、現状のシミュレーション技術の課題の抽出を行った。また、現時点で最も精度が高いと考えられる乱流燃焼モデルを用いて、負荷変化時の入力条件を与えた実機規模のガスタービン燃焼器を対象とした燃焼シミュレーションを実施することにより、負荷変化時におけるガスタービン燃焼器内の燃焼挙動を明らかにした。

4.3.1 詳細反応機構を用いた燃焼シミュレーション

1) 解析手法 本研究では、基礎方程式として、各化学種質量保存方程式を加えた圧縮性Navier-Stokes方程式を用い、状態方程式として熱的完全気体を仮定した。解析を実行する際には、流体と化学反応の特性時間が異なることを考慮し、支配方程式に対して時間分離法を適用した。流体方程式を解く際には、反応率を零とする化学反応凍結状態を仮定し、一方、化学反応方程式を解く際には、流体空間運動を無視し、体積と内部エネルギー一定を仮定した。流体の解析手法としては、一般的な圧縮性流体手法を用いる。数値流束はHLLC/HLLハイブリッド法により評価し、MUSCL法で高次精度を実現する。制限関数として、minmod関数を用いた。時間積分法として3次精度TVD Runge-Kutta法を採用した。化学反応方程式の解法には、準定常仮定による定式化と質量保存則制約条件を併用したERENA法²⁰⁾を用いた。

2) 解析条件 本研究では、基礎流れ場を対象としてい

ること、計算負荷の2点を考慮し、基礎的な形状かつ2次元解析を対象とした。燃料としてCH₄を用い、酸化剤は空気とする。噴射予混合気体は、圧力0.1 MPa、温度800 K、噴射速度は、150 ms⁻¹とした。噴射速度の影響を見るため、噴射速度を75ms⁻¹、35 ms⁻¹とした計算も実施した。予混合気体の当量比として、1.0, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5を用い、燃焼場に対する当量比の影響を調べた。詳細化学反応機構として、KUCRS^[21]を用いて生成した68化学種、334化学反応を、DRG法^[22]により縮退させた33化学種、150化学反応の機構を採用した。

3) 解析結果 当量比を時間的に一定とした場合の、各当量比に対する瞬間温度場を図15に示す。当量比1.0から0.7の条件では、保炎が確認できた一方で、当量比0.5や0.6では、燃焼場を維持できないことがわかった。これは、低当量比の場合には、着火遅れ時間増大や燃焼速度低下により、流入してくる予混合噴流に対して、十分な燃焼を維持することができないためである。また、低当量比条件においては、噴射速度を増加させることにより保炎が可能となった。したがって、保炎に対しては、再循環領域を形成する未燃予混合気体の噴出速度が重要なパラメータであり、燃焼器高さが大きな影響を及ぼすことを示す結果が得られた。

当量比を動的に変化させた計算について、下流のある断面における温度と代表的な化学種の時間履歴を図16に示す。まず、当量比1.0から0.5への変化に追従して、それぞれの物理量が応答し変化することがわかる。温度、CO₂の分布では、当量比の変化時間幅が短いほど、変動の振幅値が大きくなる傾向が示されるが、中間生成物であるOやOHの分布にはその傾向は現れていない。温度分布において明確であるが、当量比変化後に収束していく温度値は、断熱火炎温度に近い値となっており、動的な当量比変化による温度や化学種分布への影響は小さいといえる。ただし、当量比の変化時間幅が非常に短い場合には、応答性が悪化するため、注意が必要である。

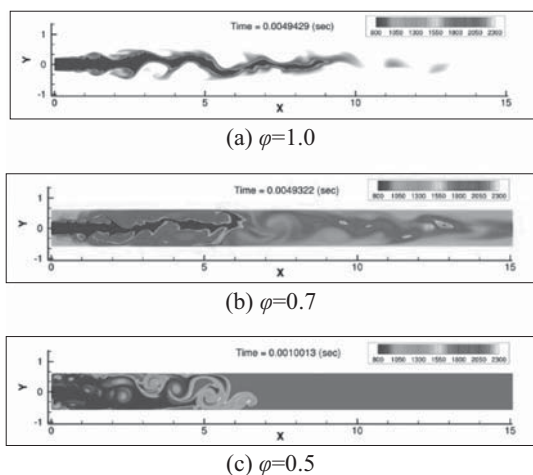


Fig.15 Instantaneous temperature distributions for three different equivalence ratio conditions.

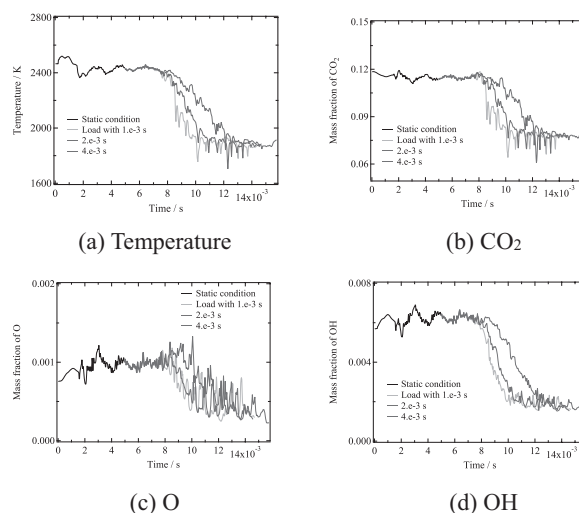


Fig.16 Time histories of temperature and mass fraction of species.

4.3.2 実機規模ガスタービン燃焼器のシミュレーション

1) 解析手法 本研究では解析ソルバとして、非構造格子に適用可能なFrontFlow/redを京都大学、(一財)電力中央研究所、および株式会社フローデザインにより改良したコード (FrontFlow/red-comb) を用いた。乱流燃焼モデルとしては、Flamelet/progress-variable法とG方程式をカップリングした部分予混合乱流燃焼モデル^[23/24]を採用した。

2) 解析条件 解析対象である実機規模のガスタービン燃焼器の概略を図17に示す。これらの入口における当量比φおよび混合分率Zを時間的に変化させることにより、負荷追従時のガスタービン燃焼器の運転状態を再現した。

乱流モデルとして標準Smagorinskyモデルを、流体モデルとしてZero-Mach数近似を用いた。Flamelet libraryおよび層流火炎伝播速度データは、圧力104.35kPa、燃料温度203.07℃および酸化剤温度617.15℃における一次元燃焼解析により作成した。燃料にメタン、エタン、プロパンの混合気体、酸化剤に空気と排ガスの混合気体を用い、約280化学種、1600反応を考慮した詳細反応モデルを用いた。

3) 解析結果 当量比を0.5から1.0へと時間的に変化させた条件における各当量比条件時の燃焼器内ガス温度分

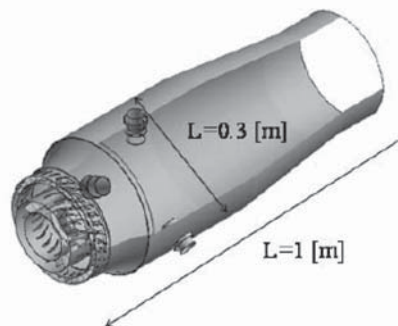


Fig.17 Schematic of the actual gas turbine combustor.

布を図18に示す。図より、当量比の上昇とともに、燃焼器内部が高温になっていることがわかる。また、燃焼器出口におけるガス温度分布の経時変化を図19に示す。燃焼器出口ガス温度は当量比の増加とともに線形に増加しており、当量比の変化に応じて燃焼状態が迅速に反応していることを示している。また、燃焼器を設計する上では、耐久性評価の観点から、燃焼器壁面温度の評価が重要となる。そのため、壁面温度に影響の大きい、壁面最近傍セルのガス温度の経時変化を評価した。その結果を図20に示す。図より、壁面ごく近傍のガス温度分布は、ときおりピークを持ちながら、徐々に増加していることがわかる。このことは、燃焼器壁面近傍では高温のガスと低温のガスが頻繁に入れ替わっていることを示しており、このような領域においては、熱疲労に対する配慮が必要となるが、このような箇所の特定に対しても、燃焼シミュレーションが有効であることが確認できた。

このように、入口境界条件を動的に変化させることで、負荷変化時のガスタービン燃焼器内の燃焼状態を評価可能であることが示された。一方で、負荷変化が数分にわたる場合には、現状の計算機性能をもってしても、計算時間が問題となることから、燃焼シミュレーションの高速化が今後の課題として挙げられる。

(丹野 賢二*)

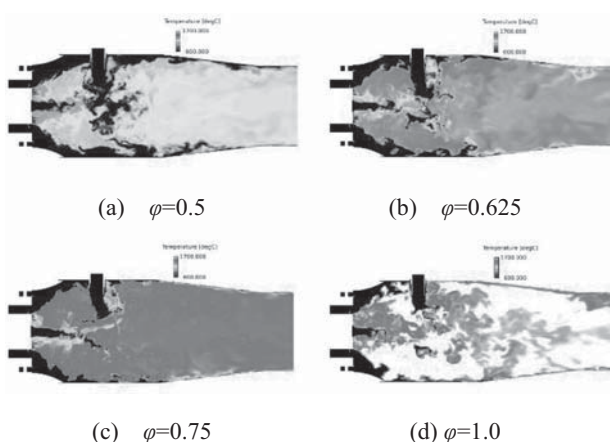


Fig.18 Distributions of temperature for each time under load increase

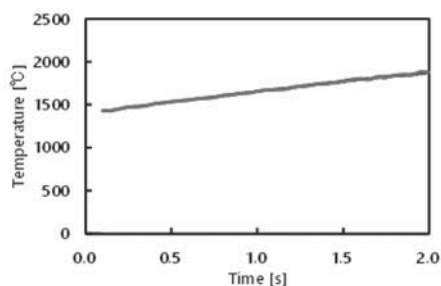


Fig.19 Time history of gas temperature at the combustor outlet.

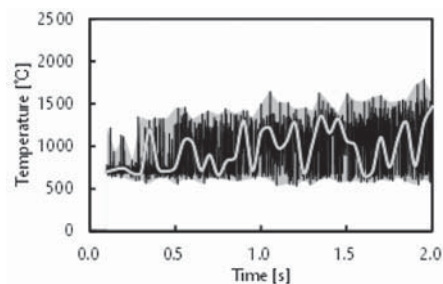


Fig.20 Time history of gas temperature near the combustor wall.

4.4 非定常流れシミュレーション高度化

再生可能エネルギーの大量導入が進めば、その急峻で大きな負荷変動を補い、ユーザへ電力を安定的に供給する必要性が求められることになるが、これに適した電源として発電容量で大きな比率を占めるガスタービンが果たす役割は大きいと考えられる。

発電用ガスタービンを構成する主要要素（圧縮機、燃焼器およびタービン）と熱サイクルの原理は概ね航空機のジェットエンジンと同じで、燃料から得られる熱エネルギーを一方では発電機を介して電力を取り出し、もう一方はファンで推力を得るという違いがある。ジェットエンジンは離陸時に秒単位で一気にフルパワーを得ることができるため、負荷追従性という観点で優れた能力があることは公知の事実であるが、原理的に同じ機械であるといっても発電用ガスタービンでこれを実現することは必ずしも簡単ではない。ジェットエンジンでは、部材の軽量化が燃費向上のために重要で、高強度材を用いた薄肉化を実現しているが、発電用大型ガスタービンでは重量によって定格運転条件での燃費（効率）が変化することはなく、低コストで強度を満足させるため、低強度材で厚肉化する場合、ロータの慣性モーメントも大きくなる。従って、定格速度まで、より短い時間で加速させる急速起動条件において、重いロータでは、燃料の投入量を増やし、ガス温度の上昇によりタービン入口の体積流量が増加するため、圧縮機吐出圧力が上昇する。これに伴い、起動中の圧縮機の負荷が増大し、起動特性が変化することが想定される。

4.4.1 急速起動時圧縮機旋回失速特性の非定常流れシミュレーション

ガスタービン圧縮機のフローパスにおいて、起動昇速中は定格運転条件に比べて作動圧力比が低いことにより、流路の環状面積が狭い後方段では相対的に体積流量が増加し、チョーク側での作動となるため吸気流量が制限される。その結果、流路の環状面積が広い前方段では軸流速度が低下し、迎角が大きくなることにより、翼列の一部において失速が発生する。この失速領域（失速セル）は通常、ロータ回転速度の50%程度の速度で周方向背側に連続的に移動する、いわゆる旋回失速が発生する。旋回失速発生時には、失速領域と非失速領域が周方向に

*（一財）電力中央研究所

旋回することによりフローパス内で圧力の変動が発生し、圧縮機翼や周囲の配管等を励振するほか、最悪の場合起動中にサージングに入ることも懸念される。

小型のガスタービンであれば、試作した実物を用いた試験で実際に何種類も確認することが可能であるが、大型になると製造に要する期間も長く、容易には実施できない。また、実機やスケールの小さいモデル試験機による試験を実施しても、詳細な内部流動までの計測は難しく、ケーシング面での圧力変動量や旋回失速セル数などの計測に限定される。従って、圧力変動量が大い場合や旋回失速セル数による励振周波数と翼振動数の共振が発生した場合の対応として、可変静翼開度の変更などによる調整が考えられるが、限られた計測データに基づく試行錯誤が必要となっているのが現状で、解析でこれを補うことが求められている。

以上の背景から、圧縮機の旋回失速を機器の信頼性に影響がない範囲に抑制し、急速起動ガスタービンを実現するためには、旋回失速の発生メカニズムを詳細に把握し、それに対応した対策を準備しておくことが必須となるため、本研究ではその第一段階として、非定常流れシミュレーションによる旋回失速の評価可否の確認、及び急速起動時に発生し得る技術課題を洗い出すことを目的として、検討を実施した。

1) 解析モデル 旋回失速現象は失速セルが周方向に旋回する、時間的にも空間的にも非定常な流れ現象であり、シミュレーションにおいても実際の空間、及び時間進行を再現する大規模なものとなるため、数値シミュレーションによる旋回失速特性の評価は極めて難しいと考えられている。また、周方向に不均一な現象であるため、モデル化範囲は大型ガスタービン圧縮機の前方及び中間8段の周方向全周とし、圧縮機フローパス上流側の吸気ダクト及びストラットも解析対象とした。メッシュ点数は解析時間も考慮のうえ、解析範囲全体で3.8億点とした。約50%回転数条件での非定常解析の実施前に定常解析を実施し、定常解析結果を初期値として非定常解析を実施した。

2) 解析結果 今回の解析環境では、計算時間はロータ1回転あたり4日程度であり、10回転分の解析実施のために約40日を要した。非定常流れシミュレーションによる起動中における圧縮機内部の作動状態の予測精度確認のため、軸方向の圧力分布について解析結果と実機実測データと比較した結果は良好に一致しており、非定常流れシミュレーションにより圧縮機内部の段方向負荷分担が精度良く再現されていることが確認できた。また、初期条件とした定常解析結果で認められた2段静翼ハブ側の低軸流速度領域が、時間の進行とともに周方向に失速領域と非失速領域に分割されながら、失速領域が下流側まで拡大している。失速領域が5段まで到達した後はほぼ周期的な流れ場となり、失速セル数は4で、これも実機の計測結果と一致することが確認できた。

急速起動による起動時圧力比上昇を模擬した条件では、図21に示す通り、4つの旋回失速セルのうち2つが合体し、セル数は4セルから3セルへと変化した。各旋回失速セル間の周方向距離、及び各失速セルの大きさは不均一となっており、引き続き解析を実施した場合には更に旋回失速セルの発生状況は変化するものと考えられる。これら圧縮機の3次元CFD多段全周非定常解析で、急速起動条件にて旋回失速セル数の減少が認められ、セル数が変化する課題と、これを制御する手法の必要性を明らかにした。

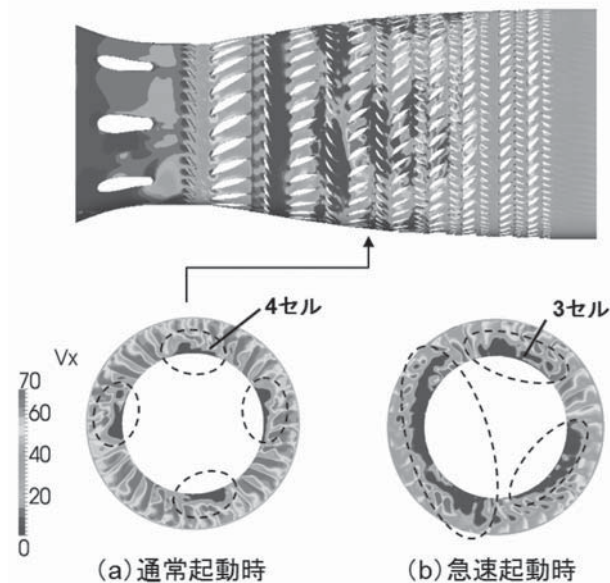


Fig.21 3段動翼出口 軸流速度コンタ

4.4.2 非定常流れシミュレーション手法の高度化

ガスタービンにおける圧縮機およびタービン翼列に関する非定常流れの数値シミュレーションについて調査研究を実施した。東京大学で開発したシミュレーションコードを改良し、特に圧縮機の翼端間隙流れに注目して、間隙幅が非定常流れ不安定現象に与える影響を明らかにした。また、既存の低速多段圧縮機実験装置における非定常流れの数値シミュレーションを試行し、今後の解析法の改良について課題と実験データ取得の必要性を明らかにした。実験における非定常流れ計測法についても検討を行い、シミュレーション手法の検証に資する実験の方法を考察した。

4.4.3 まとめ

非定常流れシミュレーションに関する研究成果として、起動条件に応じた解析を実施し、旋回失速の発生や現象を評価・分析可能である目途が得られた。さらに高度な解析技術や解析の高速化についても調査し、技術課題を明確にすることが出来た。

(伊藤栄作, 荒木勝人*)

4.5 構造過渡応答シミュレーション

急速起動時もしくは急速負荷変化時の構造過渡応答に関連し、発電用大型ガスタービンの圧縮機及びタービンの回転部（動翼・ロータ等）と、静止部（ケーシング等）の間で、回転部の回転数上昇の遠心荷重による伸びに対して、静止部・回転部共に温度変化による熱変形が時間的に遅れる影響で回転～静止部材間の間隙（クリアランス）は減少し、最悪の場合、重接触することが懸念される。

4.5.1 急速起動時過渡応答シミュレーション

急速起動に優れる航空機のジェットエンジンでは、部材の軽量化が燃費向上に重要な役割を果たすため、高強度材で薄肉化を実現し、部材の熱容量が小さいという特徴がある。一方、発電用大型ガスタービンでは、低コストで強度を満足させるため、低強度材で相対的に厚肉に作られ、熱容量が大きくなる。この為、温度上昇遅れの影響は、熱容量の大きい発電用大型ガスタービン特有の課題と言える。今回、解析でその影響を評価し、急速起動における課題を明らかにするため、圧縮機チップクリアランス、タービンチップクリアランス及びタービン内側シール部クリアランスを対象として調査・検討を行った（図22）。

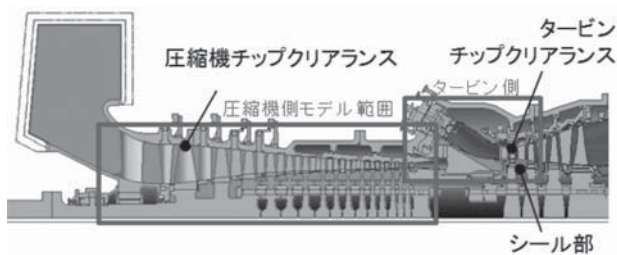


Fig.22 過渡応答シミュレーション モデル化範囲

回転部と静止部間のクリアランスは、回転系の遠心荷重による伸びと、静止系及び回転系それぞれの熱膨張による変形のバランスによって決定される。回転系の遠心荷重による伸びは、起動時の回転上昇に時間遅れなく発生するが、熱膨張については流体から部材への熱伝達及び部材内の熱伝導に時間を要するため、各部材の熱膨張による変形は流体温度の上昇に対して時間遅れを伴って発生する。動翼を支えるロータの熱容量が、静止部（ケーシング等）に比べて大きい発電用大型ガスタービンでは、静止部の熱応答の方が相対的に早く、回転上昇時に回転部の遠心伸びに対して、静止部が熱変形で外周側に拡大して逃げる関係性となる。急速起動では静止部の熱変形に関して時間遅れがある分、回転部の遠心伸びから逃げ遅れることになるため、過渡的に回転部と静止部間のクリアランスが減少することになる。本研究では、急速起動によって各部クリアランスがどの程度悪化する

のか影響度を確認するために、構造過渡応答シミュレーションを用いた調査を実施した。

解析では、運転停止後十分長い時間が経過し、冷態となった後の起動（Cold起動）と、停止後数時間で部材が冷え切らない状態からの起動（Hot起動）の2条件で解析を実施した結果、回転上昇開始から定格出力で静定するまでの非定常変化における過渡最小クリアランスは、Hot起動の方が小さい結果であった（図23）。これはHot起動の方が、静止部に比べて熱容量の大きい回転部で運転停止後の温度低下が遅く、回転部の熱伸びが残った状態で起動することにより、回転上昇に伴う遠心伸びが付与されるためである。

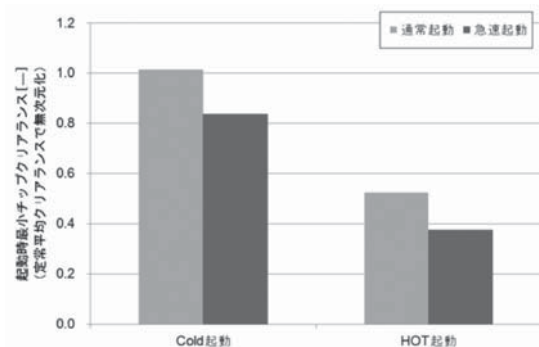


Fig.23 圧縮機最終段動翼チップ最小クリアランス

通常起動時に比べて、急速起動条件ではクリアランスが低下する傾向が解析で認められたが、その低下量もHot起動時の方がより顕著な結果であった。これも、起動開始時のロータ温度が高く、回転部の熱伸びが大きくクリアランスが狭い状態から起動するため、回転部の回転数上昇に対する静止部の温度上昇遅れの影響が、より厳しくなるためである。

接触リスクを回避するために、組立時のクリアランスを拡大してしまうと性能低下が懸念されるうえに、タービン内側シール部においては、高温ガスのシールキャビティへの流入量が増大し、ディスク温度の上昇に伴う強度低下等信頼性が低下することも懸念される。

クリアランスを制御するためには、各部材のサイズ（熱容量）、材料（線膨張係数、熱伝導率）、部材表面の流体温度や熱伝達率等を上手に設計する必要があるが、特に大型発電用ガスタービンの材料選定においては、その判断指針として強度、製造性及びコストを考慮する必要があり、クリアランス設計として最適なサイズや材料を選定することは容易ではない。一方、部材表面の流体温度や熱伝達率についても、その大小によって部材内に発生する温度分布とそれに起因する熱応力も変化するため、強度評価と密接な関係がある点で単純ではない。クリアランス変化を精度良く予測し、制御手法を構築するためには、特に部材周りの流体条件（温度と熱伝達率）を精度良く予測することが重要である。

*三菱日立パワーシステムズ(株)

4.5.2 構造過渡応答シミュレーション手法の高度化

ガスタービンの急速起動に関わる熱構造シミュレーション技術に関する世界の研究動向について、調査した結果、国内ではあまり発表数が多いが、欧州では二次空気系に関する研究プロジェクト「ICAS-GT」が1998～2000年に、その後継の「ICAS-GT2」が2001～2005年に行われており、Rolls-Royce, Alstom, MTU, Siemens, Volvo aero, Turbomeca, ITPなどのターボ機械主要メーカとSussex, Surry, Aachen, Karlsruheといった大学が参加していた。大学では実機の熱構造系を模擬したリグによる各種試験データの取得や、基礎から応用にわたる様々なレベルでの数値解析が行われており、プロジェクト終了後も継続して当分野の研究がなされていて、欧州では1つの大きな研究領域として認識されている。我が国でも、急速起動や急速負荷変化の必要性が高まっていることを契機に力を入れる必要がある。

またエンジニアリング的な側面からエンジン全体に対する熱構造シミュレーション解析例と、そのモデル化に資する回転キャビティ内の流れ場に関する文献を調査した結果から、まず二次空気系の流体・構造連成解析は数値解析技術としても流体工学的にも非常に難易度が高く、解析を実現するインハウスコードでは様々な工夫がなされているが、長時間スケールの連成解析や高速な計算に加えて、軸、ディスク、シールの入り組んだ複雑流路形状への適用が可能な用途特化型の解析パッケージが必要になると考えられる。次に、流体物理の観点での課題は、対象とする乱流場の複雑さで、ディスク周りの回転キャビティには、遠心力、コリオリ力、浮力、非軸対象大規模非定常流の各効果が現れる複雑な乱流場となり、一般的な乱流モデルがどの程度その効果を再現するのかという基礎的な知験はあまりない。近年、LESにおいてもRANSと同様に、壁関数や壁面応力のモデルを用いて計算量を削減するWall-modeled LESが、実用的な高レイノルズ数の系に対するLESの応用手段として着目されているが、回転・浮力乱流場における応用例はほとんどなく、適切なモデル化の指針も明確ではない状況であると言え、学術的には広い研究の余地があると考えられる。

これらの課題を踏まえて、過渡応答解析に向けた流体・構造連成解析手法の発展のため、乱流シミュレーションの高度化や、計算の高速化に向けた新たな格子生成法の構築などの課題抽出を先行的に実施した。

4.5.3 まとめ

本研究を通してチップクリアランスの解析を実施し、起動時の過渡最小クリアランスが急速起動で減少して接触リスクが増大する結果が得られ、リスク低減に向けた技術課題を纏めた。さらに高度な解析技術や解析の高速化についても調査し、技術課題を明確にしたという点において、有意義な成果を得ることが出来た。

(伊藤栄作, 荒木勝人*)

4.6 発電量制御できるガスタービンの効率維持

4.6.1 緒言

再生可能エネルギーの導入拡大への対応に、起動速度や負荷変化速度に優れたガスタービンが有望とされている。例えばドイツでは、昼間の太陽光発電の増加により、朝と夜の2つの時間帯において再生可能エネルギー以外の発電が増える電力供給状態となっている。これに対応するため火力発電では、急速起動や一日に複数回起動停止させるMulti Start and Stopの需要が高まっている²⁹⁾。そこで、中規模ガスタービンのうち、発電量制御と効率維持技術を両立可能なガスタービンシステムとして期待できる2軸ガスタービンを対象として、2軸ガスタービンに特有な運転方法と実用化に向けた技術課題について、システム性能および信頼性の調査、検討を実施した。

4.6.2 2軸ガスタービン発電量制御システムの検討

1) アシストモータ利用2軸ガスタービンシステム 本稿では、中規模の2軸ガスタービンの高圧軸にアシストモータまたは発電機を連結したシステム²⁹⁾について検討する(図24)。通常の2軸ガスタービンでは、入口案内翼IGVの開度によって、運転点の燃料流量が一意に決まるため、1軸ガスタービンのように負荷を保ちつつIGVを開いて燃料流量を減少させることができず、部分負荷時や大気温度変化時に性能が低下する場合がある。そこで、効率を維持しながら発電量制御が可能となるよう、高圧タービンHPTと低圧タービンLPTの出力配分を変更させるため、ガスジェネレータ側(高圧軸側)にアシストモータまたは発電機を連結した。アシストモータを利用した2軸ガスタービンでは、圧縮機とHPTがバランスする運転点を高速に変化させることが可能であり、部分負荷特性や大気温度特性の他、急速起動性や急速負荷追従性を改善できる可能性がある。

そこで、静特性および動特性の解析モデルを用いて、性能と運用性の改善効果を評価するとともに、FEM解析を用いて急速起動時の信頼性を評価した。

*三菱日立パワーシステムズ(株)

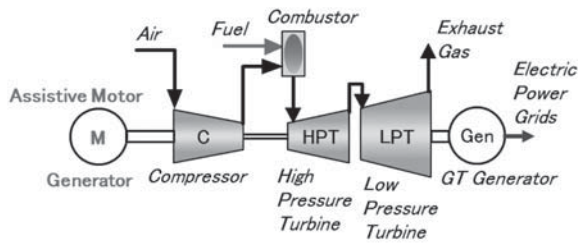


Fig.24 2-shaft gas turbine with assistive motor

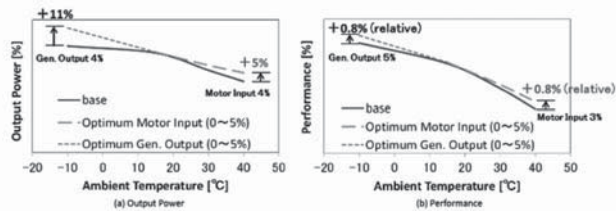


Fig.25 Temperature characteristics

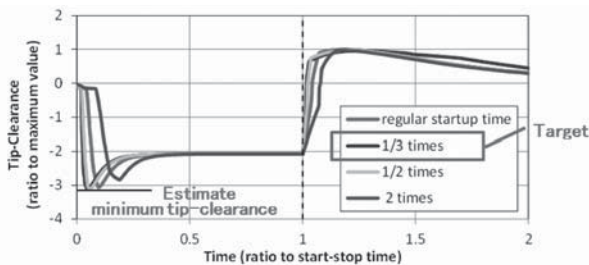


Fig.26 Trend of turbine blade tip-clearance

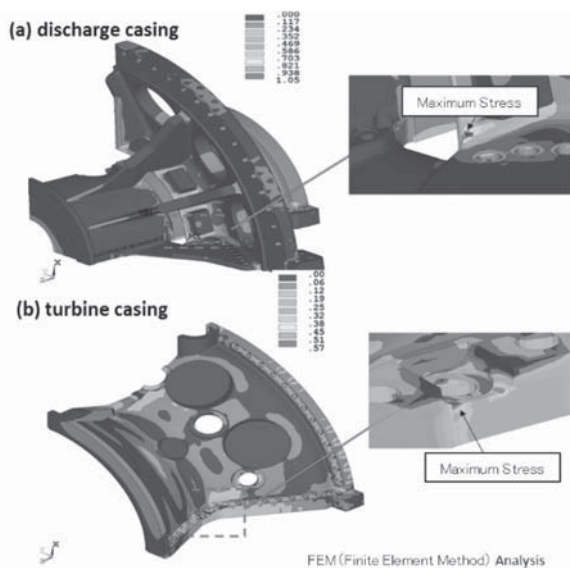


Fig.27 Stress distribution in fast startup

2) 部分負荷特性と大気温度特性の検討

通常の2軸ガスタービンの定格運転条件のベース出力に対して最大5%の幅でモータ入力または発電機出力を変化させた場合について、部分負荷特性と大気温度特性を評価した(図25)。高気温時にはモータ入力により出力5%、効率0.8%の向上、低気温時には発電機出力を付加することで出力11%、効率0.8%の向上が見込めることが確認できた。

3) 急速起動時の信頼性評価 起動時間によって、ケーシングおよびロータの温度変化が異なるため、これら部材の熱伸びの変化による動翼先端間隙および部材に生じる熱応力の影響を評価した。中規模ガスタービンを対象に、従来の起動停止時間をベースに1/3、1/2および2倍の4ケースについて、タービン動翼の間隙、タービンシェルおよび吐出ケーシングに発生する応力をFEM解析により検討した(図26、図27)。

動翼先端間隙については起動時間に対する最大間隙変形量の変化は少なく、目標起動時間における信頼性確保の見通しを得たが、熱応力については実機の強度基準と照らして詳細に評価する必要がある。

4) 急速負荷追従時の信頼性検討 さらに負荷変動に対し、アシストモータを可動させ急速に負荷追従を行うため、ロータおよび軸系には負荷変動に伴うねじり応力の変動が繰り返し付加される。そこで、急速負荷変動時の運転状態を評価する動特性解析モデルを構築し、想定した負荷変動に対する圧縮機動力、HPT出力、HP回転数からトルク変化を算出した(図28)。ここで得られた負荷変動に対するロータおよび軸系のねじり疲労強度について検討した結果を図29に示す。その結果、急速負荷変動に伴うロータ応力変動は疲労強度を満足できることが分かった。

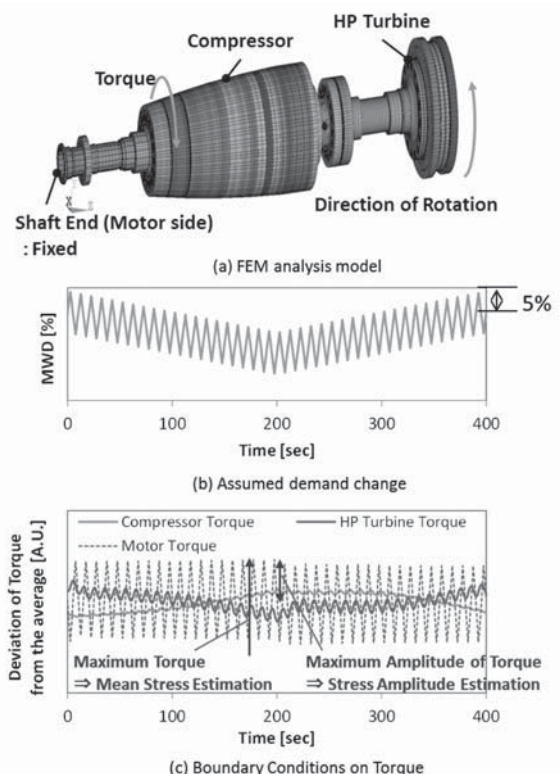


Fig.28 Stress estimation in fast power fluctuation tracking

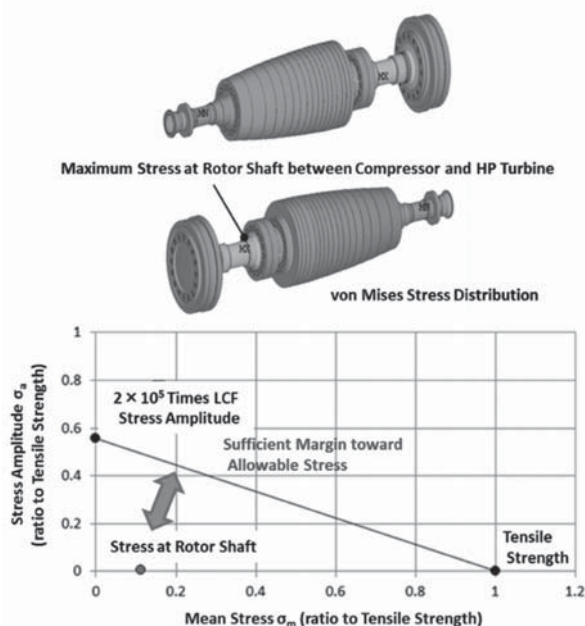


Fig.29 Estimation of rotor fatigue strength

4.6.3 まとめ

中規模2軸ガスタービンを対象として、ガスジェネレータ側をモータでアシストしたときの性能と運用性の改善効果を評価した。静特性解析を用いた性能予測により、モータ入力と発電機出力により、部分負荷特性と大気温度特性を改善できる見通しを得た。50%負荷の目標性能の達成に向け更なる効率向上が今後の検討課題である。また、動特性解析とFEM解析を組み合わせた評価により、急速起動時におけるタービン動翼先端間隙、ケーシング熱応力を予測した。動翼先端間隙については、目標起動時間における信頼性確保の見通しを得たが、熱応力については実機の強度基準と照らして詳細に評価することが課題である。さらに想定した負荷変動に対する急速負荷追従時の信頼性評価も実施し、ロータおよび軸系のねじり疲労強度について検討した。今後は、実際の負荷変動を模擬した過渡応答評価を検討する必要がある。

(岸部忠晴, 高橋康雄*)

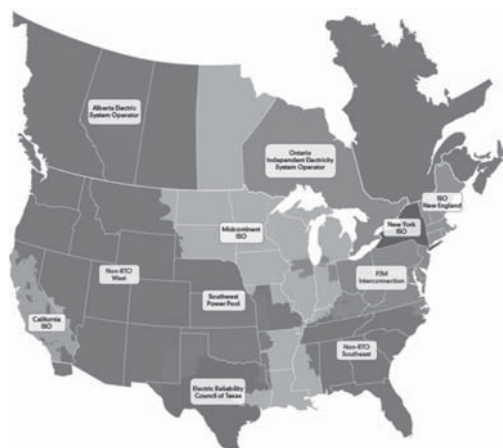
4.7 航空転用ガスタービンを用いた系統安定化制御技術

航空転用ガスタービンは、航空機用ジェットエンジンを発電、回転機械駆動用途に転用したガスタービンである。航空転用ガスタービンはアメリカなど再生可能エネルギーが大量に導入されている地域において、系統安定化電源として普及している。そこで、日本国内で再生可能エネルギーが大量に導入された場合に求められる系統安定化電源としてのガスタービン発電設備に求められる技術検討の参考とすることを目的として再生可能エネルギーが大量に導入された北米における航空転用ガスタービンの運用実態を調査した。

4.7.1 航空転用ガスタービン発電システムを用いた系統安定化の事例調査

航空転用ガスタービンの代表機種である、発電出力が50MW級のLM6000とLM6000をベースとした100MW級のLMS100（ともにGE社製）、この2機種が系統安定化電源として用いられている事例を調査した。

1) アメリカの電力市場とLM6000・LMS100ガスタービン発電機設置状況 北米大陸の電力系統は、アメリカのアラスカ州とカナダのケベック州を除いて、東部地区、西部地区及びテキサス地区の3地区に分かれている。この3地区は互いに連系しておらず他の地区とは同期できないため、3つの地域は、それぞれ独自の需要供給バランスと系統安定化の対策を行う必要がある。北米では独立系統運営会社（ISO：Independent System Operator）がそれぞれの管理区域における電気の供給と送配電を、地域送電機関（RTO：Regional Transmission Organization）が送電インフラを管理しており、ISOとRTOという別々の機能を有した組織体の一つの構成単位となっている。アメリカとカナダには図30に示すように全部で9つのISO/RTOが存在しており、ISO/RTO評議会（ISO/RTO Council）を構成している。ISO/RTO管理区域では発送電が分離しており、電力供給は基本的に小売りの競争市場原理で成り立っている。北米大陸のISO/RTO全体の管理規模は、人口2.3億人に対し、発電設備容量は714 GW、送電線延長は467,400 kmになる。日本全体では人口1.2億人に対し、発電設備容量229 GW、送電線延長144,600 kmであり、規模比較でいえば北米大陸のISO/RTO管理規模は日本全体のおおよそ3倍となる。また、北米大陸にはISO/RTO管理区域に所属していない、規制市場（図30で濃いハッチングの地域（北東部、南東部、西側などで一部はNon RTOと記載）が存在する。これらの地域では発送電が分離しておらず、州毎に分散した各電力会社による規制市場となっており、電力会社により発電、送電、配電、運用が管理されている。アメリカにはNon-RTO West/Southeastという2つの規制市場がある。2地域の合計で423GWの発電設備

Fig.30 北米大陸のISO/RTO管理区域²⁹⁾

*三菱日立パワーシステムズ(株)

容量を有し、北米ISO/RTO全体の約3分の2の規模になる。

航空転用ガスタービンLM6000は1990年代後半から2000年代初期にかけてアメリカにおける電力自由化の流れにともなって、図31のように爆発的に販売されたことが分かる。LMS100はLM6000ガスタービンを核として、航空転用ガスタービンの高い機動性を維持しながら、重構造ガスタービン6FAの圧縮機を低圧圧縮機として利用しインタークーラ技術を採用入れて高出力化を実現したガスタービンである。LMS100は2004年に登場し、図32に示すように2013年末までに62台が生産されている。図33はアメリカにおけるLM6000ガスタービン発電機の州毎の設置分布地図である。2015年9月時点で、アラスカ州とハワイ州も含み434台、カナダを含めば北米大陸で483台が設置されている。LM6000ガスタービン発電機は単機シンプルサイクルで40～50MW級の発電機であり、蒸気タービンとの組み合わせや運用方法により、ベース発電やミッドメリット発電としての使い方も可能である。1機当たりの発電量を仮に50MWとすると434台分で21.7GWの発電容量となり、アメリカ全体の発電容量の約1000GWのうちおよそ2%の発電能力をまかなっている。また、434台のうち300台以上はピーク発電用としてシンプルサイクルで運用されている。従って、LM6000ガスタービン発電機によるピーク対応能力はアメリカ電力需要の約1.5%と言える。台数分布を見ると、電力の大消費地であるカリフォルニア州、テキサス

LM6000 Genset Orders in USA since 1990



Fig.33 アメリカのLM6000設置分布 (2015年9月時点)[※]

州、北東部地区にLM6000ガスタービン発電機の設置数が多い。

2) 系統安定化のためのさまざまな実例 航空転用ガスタービンを原動機とする発電システムがアメリカ国内において電力系統の安定化に貢献している実例として、以下の発電所、機関の現地調査を行った。本節ではその代表例を紹介する。

- ・カリフォルニア州 Sentinel Energy発電所
- ・カリフォルニア州 Turlock発電所
- ・バージニア州 Chesapeake発電所
- ・ニュージャージー州 Kearny発電所
- ・ルイジアナ州 T. J. Labbé発電所・Hargis-Hébert発電所
- ・カンザス州 Emporia発電所
- ・GE

(1)ニュージャージー州 Kearny発電所

ニュージャージー州に位置するKearny発電所はPJM ISO管理区域に所属し、PSE&G (Public Service Electric & Gas) というアメリカ最大の電力会社により運営されている。本発電所では図34に示すような起動から10分で最大出力42.7MWに到達させる高速起動を実現している。また、PJMの発電指令に追従できる性能を持っている。図35に示すような制御追従試験が行われ急速負荷追従性能が実証されている。このように、本発電所は高速起動性を予備力市場に、負荷追従性能を周波数調整市場に、さらにSSSクラッチを用いて無効電力供

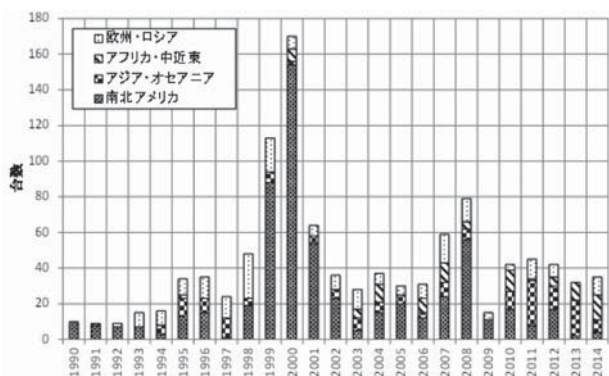


Fig.31 LM6000ガスタービンの年代別世界展開台数

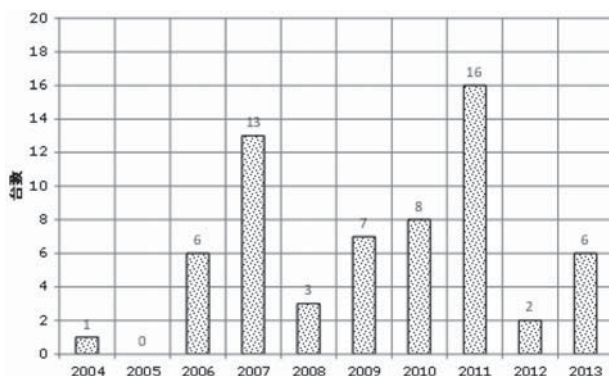


Fig.32 LMS100ガスタービンの年代別世界展開台数

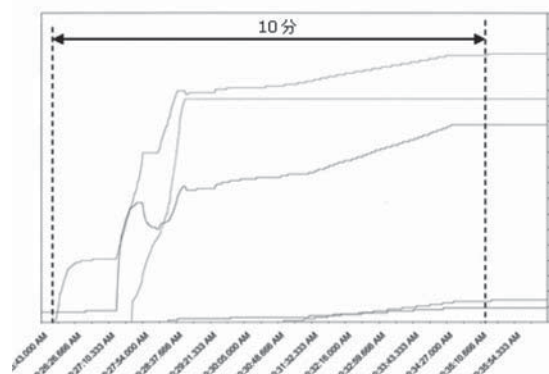


Fig.34 Kearny発電所 LM6000ガスタービン発電機
10分起動トレンド (PSE&Gより入手)

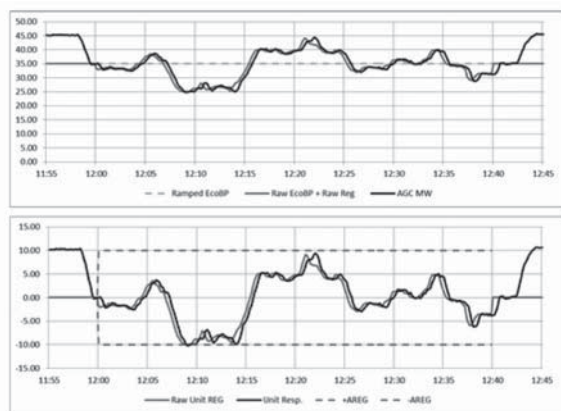


Fig.35 Kearny発電所 AGC運転試験 (PSE&Gより入手)

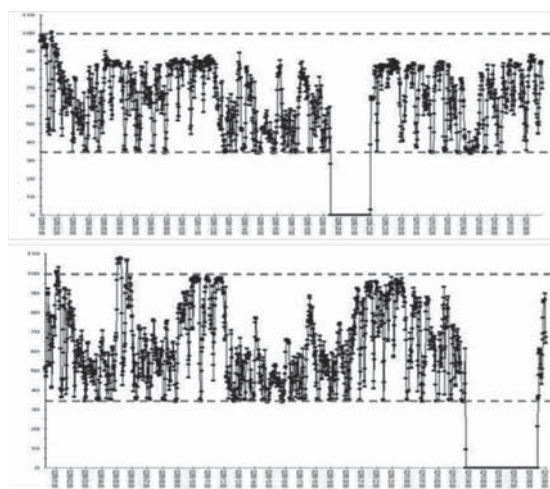


Fig.36 アメリカテキサス州LMS100ガスタービン発電機の風力協調運転 (GEより入手)

給による電圧調整市場にとPJMの制度において様々なサービスを提供できるようにしている。

(2)GEでの聞き取り調査

図36はGEに聞き取り調査を実施した際に得たテキサス州にある発電所の所有する2台のLMS100ガスタービン発電機で負荷追従運転をした例である。この発電所では最低・最大負荷の契約をそれぞれ35MW・100MWとしており、35MW以下では発電を停止する。2台の発電機で多少の違いはあるが、運転中はどの時間帯でも分単位で最低・最高負荷間の上下を24時間以上続けている。

4.7.2 まとめ

再生可能エネルギーの浸透や電力自由化が進んでいるアメリカにおいて、航空転用ガスタービンが電力システムの安定に貢献している実態を調査した。再生可能エネルギーが急速に浸透している日本においても高効率・大出力の大型重構造ガスタービンのコンバインドサイクル発電設備における急速起動性能、負荷追従性能の向上のための技術開発を進めるとともに、中規模出力であるが急速起動、負荷応答性に優れた航空転用ガスタービンをうまく組み合わせて制御することが、今後、日本国内の電力システムの安定化のために必要と考えられる。システムの安定

化のための諸制度、技術開発は燃料価格や電源構成や性能に応じて常に見直しが行われており、今後も航空転用ガスタービンが海外でどのように系統安定に用いられているかの調査を継続する必要がある。

(米澤克夫)

4.8 需給予測に基づく発電量制御技術の検討

4.8.1 はじめに

本章では、再生可能エネルギーが大量導入された場合の電力システムを想定し、需給ギャップ（電力需要と発電量の差）の予測技術と、需給ギャップを解消するための負荷追従制御技術に関して、研究を行った成果について述べる。具体的には、電力需給ギャップ予測の技術検討、および電力変動追従制御の技術検討を実施し、それらの検討結果から得られた実用化に向けた課題を明確化した。

4.8.2 電力需給ギャップ予測の技術検討

1) 再生可能エネルギーの発電量予測モデル作成 太陽光発電や風力発電は、電力システムに大量導入された場合に悪影響を及ぼすことが知られている。この2者について発電特性を調査し、発電量予測モデルの検討および作成を行った。太陽光発電の予測モデルでは日照量を入力パラメータとし、太陽電池特性から発電量予測値を出力する（図37(a)）。また、風力発電の予測モデルでは、風速を入力パラメータとして、風車特性から発電量予測値を出力する（図37(b)）。

2) 需要家デマンドの予測モデル作成 年間で一番電力がひっ迫する夏季における需要家の電力デマンドを、一般家庭、商業施設、工場の3つで分類してデータベースを作成した。このデータベースに基づいて、人口、商業施設数、工場数などを入力パラメータとする需要家デマンドの予測モデルを作成した（図38）。

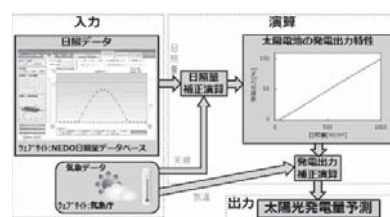
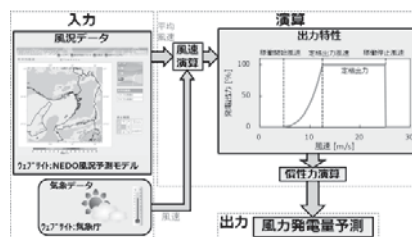
(a) 太陽光発電の予測モデル^{(29),(30)}(b) 風力発電の予測モデル^{(31),(32)}

Fig.37 再生可能エネルギーの発電量予測モデル概念図

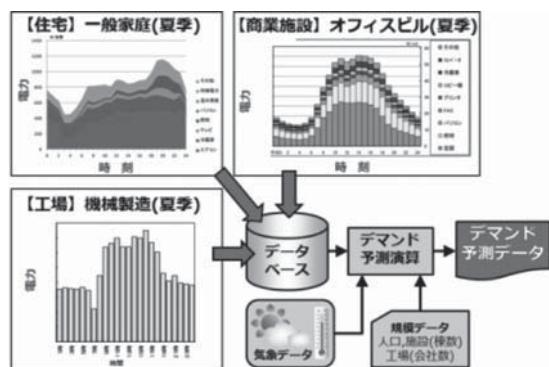
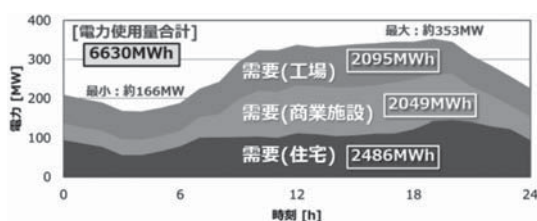
Fig.38 需要家デマンドの予測モデル³³⁾

Fig.39 想定グリッドの需要家デマンド(夏季)

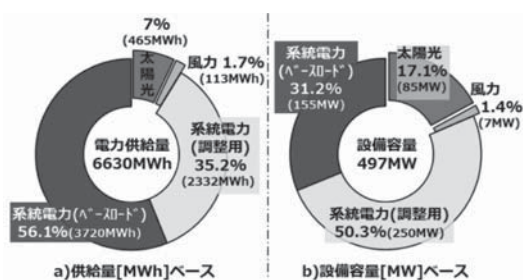


Fig.40 想定グリッドの電源構成

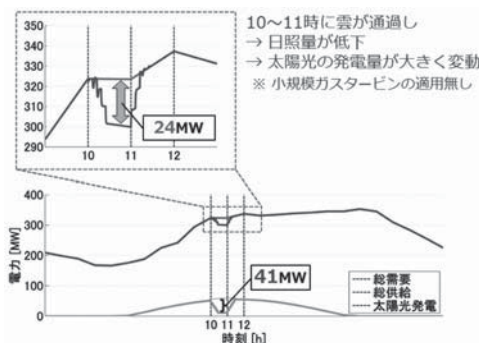


Fig.41 需給ギャップ・シミュレーション結果

3) 電力系統での需給調整制御モデル作成 電力会社が実施している需給調整制御をモデル化した。

4) 需給ギャップ・シミュレーション 前述1)～3)でのモデルを組み合わせる需給ギャップを演算できるモデルを作成し、需給ギャップ・シミュレーションを実施した。

4-1) 仮定したシミュレーション条件

(1) 想定するグリッド規模は、再生可能エネルギーの導入が進んでいる地方都市を考えて、兵庫県明石市の規模(人口約29万人)とした。図39は予測モデルから得られ

た需要家デマンド予測値(夏季)を示す。

(2) 想定する電源構成は、2015年に経産省が発表した『長期エネルギー需給見通し』⁽¹⁾の“2030年度の電源構成”に基づいて、図40に示すように設定した。

(3) 想定グリッドに対して外部からの電力供給は無いものとした。

4-2) シミュレーション結果(夏季・晴れのち曇) 夏季において、雲により日照量が変化し太陽光発電量が大きく変動した場合のシミュレーション結果を図41に示す。図41では、10～11時に雲が通過し、太陽光発電出力が10時に急落、11時から急上昇している(最大偏差41MW)。この時需給ギャップは最大24MWとなり、電力系統が持つ調整力では対応できないことを示している。

4.8.3 電力変動追従制御の技術検討 小規模ガスタービンは、高い負荷追従性、短い発停時間を有し、電力変動に対し系統の安定化(需給ギャップの低減)を図れる可能性がある(図42)。小規模ガスタービンに組み込む電力変動追従制御の概念を図43に示す。

1) 電力変動追従制御シミュレーション 4)での需給ギャップ・シミュレーション(夏季・晴れのち曇)で用いたモデルに、小規模ガスタービンによる電力変動追従制御を組み込み、シミュレーションを実施した。適用した小規模ガスタービンは、台数や性能パラメータについて変化させた(10パターン程度)。その結果、従来型ガスタービンでは需給ギャップは最大7MWとなり系統安定化を図るまでには到らなかったものの、性能向上型(高速化)ガスタービンでは需給ギャップが最大1.3MWとなり系統安定化を図れる可能性があることが分かった(図44)。

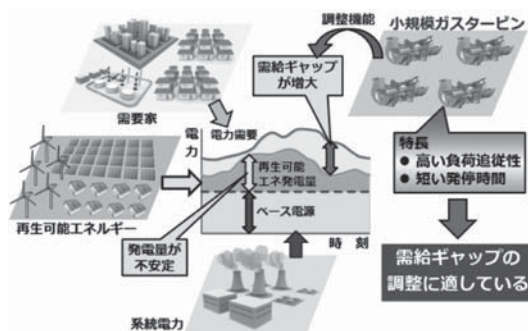


Fig.42 小規模ガスタービンによる系統安定化の概念図

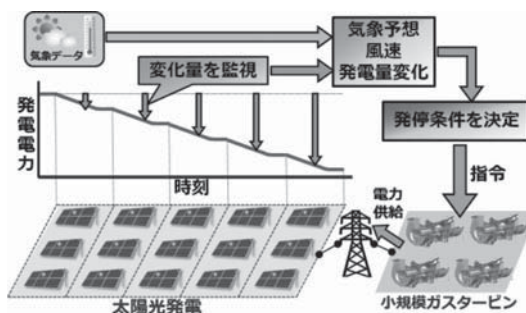


Fig.43 小規模ガスタービンによる電力変動追従制御の概念

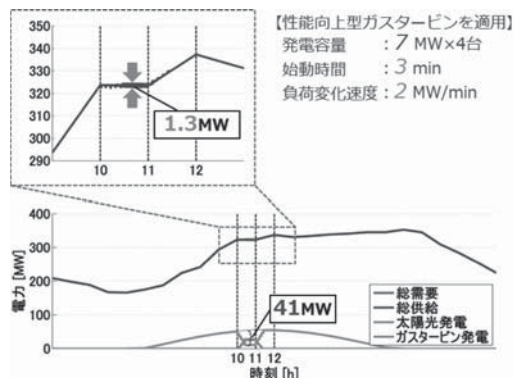
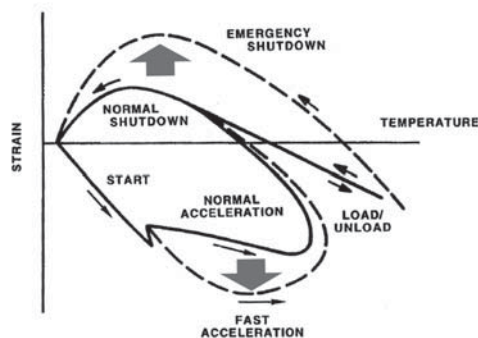


Fig.44 電力変動追従制御シミュレーション結果

Fig.45 動翼の温度-歪の履歴³⁵⁾

4.8.4 おわりに 再生可能エネルギーが大量導入された地方都市を想定し、小規模ガスタービンを用いた需給ギャップ・シミュレーションの結果から、以下の様な知見と課題が得られた。

- (1)適用する小規模ガスタービンは、従来型より性能向上（高速起動，高負荷変化速度）を図ることで系統安定化に寄与可能となる。
- (2)ガスタービンの運用制約（始動前のプレパージなど）に対する規制緩和が必要となる。
- (3)大規模な再生可能エネルギーに対しては、発電量の状態監視が運用上重要である。
- (4)本研究で想定した地方都市（人口25～35万人）は、全国に53箇所³⁴⁾も存在している。今後、再生可能エネルギーの導入が進むと考えられる地方に対し、小規模ガスタービンの適用により電力系統の安定化を図ることは有益であると考えられる。（合田 真琴）

4.9 高負荷変動に対するガスタービン材料特性評価技術

4.9.1 まえがき 従来のガスタービン発電設備は長時間の定格運転を前提とし、熱効率の向上を狙ってきたが、将来のガスタービン発電設備では従来の技術を基盤としながら、始動性や負荷追従性を重視し、過渡応答性に優れ、繰返し負荷に耐えることが重要となる。急激な負荷変動に対応できるガスタービン設備では種々の要素技術が求められ、材料に関する要素技術も欠くことはできない。

ここでは既存材料の材料特性の調査と熱疲労破損メカニズムを解明し、過酷な環境下でも劣化が少ない新材料を開発するための課題を明確にする。また、遮熱コーティング材の高負荷変動下での寿命低下について評価し、新たなコーティング材を開発するための課題を明確にする。

4.9.2 高負荷変動下で材料が受ける影響 耐クリープ性能を重視してきたこれまでのガスタービン構造体材料は高負荷変動となる運用になると付加的な損傷を受けて破損する確率が高くなるため、このような環境下では熱疲労特性に優れた材料が必要である。燃焼器、静翼および動翼等の高温部品にはNi基およびCo基超合金が用いられ、とりわけ使用環境が厳しい第1段動翼では主とし

てより高強度なNi基超合金が用いられている。このNi基超合金は高温、遠心応力場での環境に鑑みて、主としてクリープ特性を重視したものとなっている。一方で負荷変動が大きいガスタービンの使用環境は、高温から低温、そして高温というような熱サイクルを繰り返し受ける。ガスタービンの起動、定格、停止における動翼の外表面には図45に示すような温度、歪みが生じる³⁵⁾。起動を通常より早めた場合、発生する歪みをみると、起動側では圧縮の歪みが大きくなり、停止側では引張の歪みが大きくなり、ガスタービンの運転状況に依存する。このことから高負荷変動では材料に生じる損傷が増大することが懸念され、より高強度な材料が要求される。

4.9.3 各種Ni基合金のクリープ・熱疲労強度、劣化メカニズム ここではNi基超合金の第1世代合金（PWA1480, SRR99³⁶⁾, ReneN2³⁷⁾, ReneN4³⁸⁾, ReneN500³⁹⁾, TMS-286⁴⁰⁾, TMS-1700/MGA1700), 第2世代合金（PWA1484⁴¹⁾, ReneN5⁴²⁾, CMSX-4, TMS-82+⁴³⁾), 第3世代合金（CMSX-10K, TMS-75⁴⁴⁾), 第4世代合金（MX-4/PWA1497⁴⁵⁾, TMS-138A), 第5世代合金（TMS-196, TMS196GP60）および第6世代合金（TMS-238, TMS-238GP67）の19合金のクリープ特性を調査、評価した。なお、合金間の比較が直接出来るように可能な限り溶解原料・単結晶製造真空溶解炉・鋳型・熱処理炉・クリープ試験機など統一管理して実施したデータを用いて整理した。その結果を図46に示す。クリープ寿命は世代が進むにつれて増加している。

図47は主要なNi基単結晶超合金のクリープ破断特性と熱疲労特性を比較したものである。熱疲労特性は破断回数で、クリープ特性は1100℃での137MPaにおけるクリープ破断時間で示している。ReおよびRuの添加はクリープ特性を向上させ、Taの添加は熱疲労強度の向上に有効である。

図48に一方向凝固材MAR-M247LC、単結晶材TMS75, CMSX4およびPWA1480のクリープ曲線を示す。Taの添加量が12mass%と高い第一世代のPWA1480は引張/圧縮異方性が小さいことから圧縮クリープ強度が高く、熱疲労強度も高いと推測される。

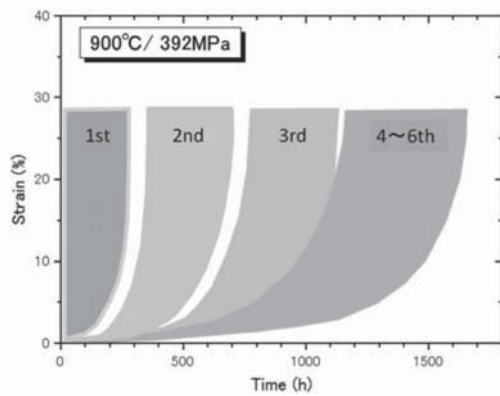


Fig.46 Ni基単結晶超合金のクリープ試験結果

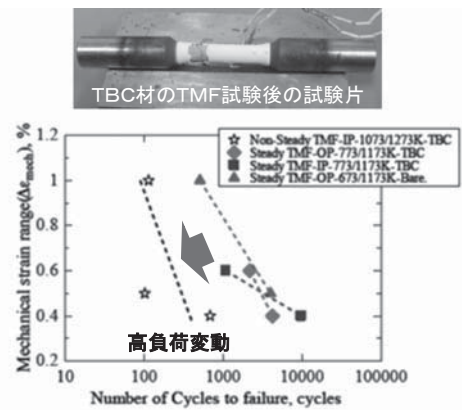


Fig.49 定常TMFと非定常TMFの寿命の比較と破壊モード

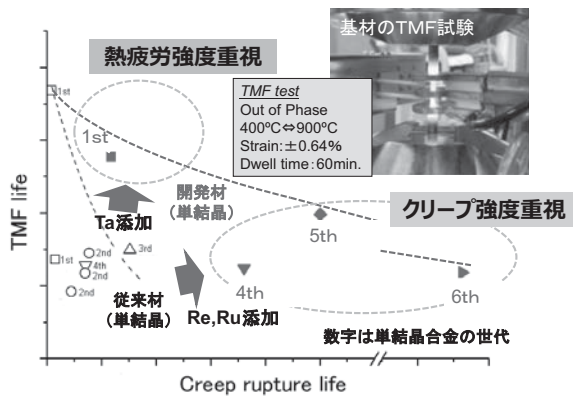


Fig.47 熱疲労寿命とクリープ破断寿命 (1100°C, 137MPa) の比較

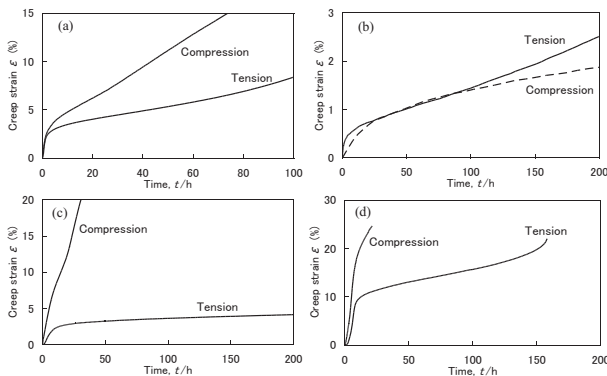


Fig.48 (a) Mar-M247LC, (b) PWA1480, (c) CMSX-4 および (d) TMS-75におけるクリープ変形の引張・圧縮異方性

4.9.4 遮熱コーティング材の高負荷変動下での寿命低下

高負荷変動に相当する非定常熱機械的疲労 (TMF) 試験によって得られた寿命の測定結果を定常TMF試験結果と比較して図49に示す。

非定常TMF負荷下の試験片の破損寿命は定常TMF負荷下における破損寿命に比べて有意に減少している。しかも、疲労負荷のごく初期の段階からセラミックストップコートの割れ/はく離/脱落が観察された。これは非定常熱サイクルの負荷により皮膜の割れが助長されたことを示すものである。

4.9.5 あとがき 調査研究にて得られた技術課題を図50に示す。高負荷変動に関する材料の技術課題として、Ni基超合金に代表される材料のクリープ強度向上と熱疲労特性向上および遮熱コーティングの熱疲労特性向上が挙げられる。また、遮熱コーティングと冷却孔を模擬した試験評価手法や実機規模での耐久性試験も重要である。また、発電設備としては低コスト化のための技術課題も不可欠であり、ろう付けやレーザープロセス等による補修技術の開発も挙げられる。

(齊藤大蔵, 岡崎正和, 寛幸次, 原田広史)

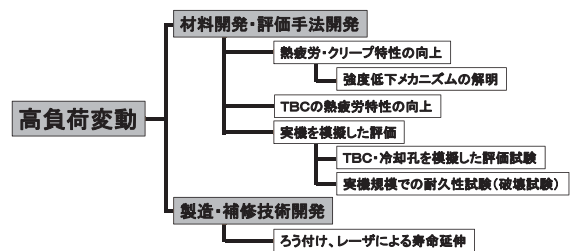


Fig.50 高負荷変動における材料に関する課題

5. 開発プロジェクトの提案に向けて

5.1 開発すべきガスタービン設備の目標性能

本技術の系統安定化への役割は、主に(1)夕方から夜にかけての急激な太陽光発電量の減少への対応、(2)再エネ由来で日中に生じる急激かつ大きな負荷変動への対応の2点になる。(1)に対しては、急速起動特性とともに発電設備の規模が、(2)に対しては、急速起動と負荷変動追従の速度、ならびに高効率での運用可能範囲を広めるために最低負荷の引き下げが求められる。図51に各技術の役割分担、図52に系統安定化対応先進ガスタービン発電設備の役割を整理する。

表2に大型・中型・小型のガスタービンまたはGTCCについて、現状の性能と2030年頃の実現を想定した開発目標を示す。開発目標としては、上記に要求される役割を踏まえて、起動時間、負荷変化率、効率、最低負荷の4項目について、現状の性能を踏まえ実現を見込める挑戦可能な数値を設定した。

大中型ガスタービンを用いたシステムについては、現時点において負荷変動対応電源として効力を発揮している揚水発電並みの起動時間と負荷変化速度を持たせることを目指す。現状のGTCCの負荷変化率は5%程度であるが、航空機用エンジンの機能が発電用ガスタービンで実現できれば、揚水発電並みの起動・負荷追従特性の実現が可能となる。実に航空転用ガスタービンは、ガスタービン単機として揚水発電を上回る負荷変動速度を有している。スケールアップする発電用大型GTCCで実現させるには、ガスタービン翼や燃焼器の熱疲労寿命改善など、乗り越えなければならないハードルは高くなるが、最近の目覚ましい材料の進歩や製造技術を含む設計技術の進展により、2030年・2050年という時間軸での挑戦においては、達成可能な目標と考えられる。

また、CO₂削減のためには高効率を追求することも重要である。GTCCとしての効率（低位発熱量（LHV）基準）の目標としては、定格時の効率として、大型で現状

最高レベルである62%を超える63%、中型で58%を目指す。さらに、実運用として多くなると考えられる部分負荷帯での効率向上は重要であり、50%負荷時で大型56%、中型52%の達成を狙う。なお、GTCCとしての起動性を確保するためには、HRSGと蒸気タービンの負荷追従性向上にも合わせて取り組む必要がある。

GTCCの構成には、ガスタービン、蒸気タービン、発電機が一本の軸ですべて連結されている一軸式システムと、複数のガスタービンそれぞれに発電機が連結されるとともに、その排ガスを一つのHRSGに集め大型の蒸気タービン1台を駆動して発電機に連結させる多軸式システムがある。急速起動性と負荷追従性向上の観点から、一軸式より多軸式GTCCが有利であり、多軸式の適用を積極的に活用することを考えるべきである。また、多軸式GTCCは、蒸気タービンの運転を維持したままガスタービンの運転台数制御により負荷調整することが可能

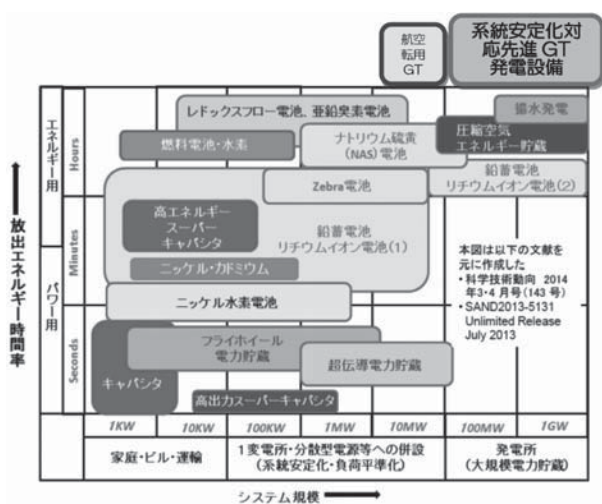
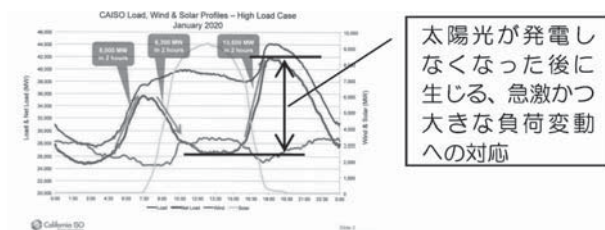
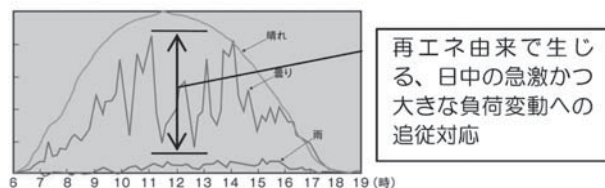


Fig.51 負荷変動吸収を担う他技術との棲み分けの整理



(1)夕方から夜にかけての太陽光発電量の急激な減少への対応



(2)日中の急激かつ大きな負荷変動への対応

Fig.52 開発するガスタービン設備が系統安定のために担う役割

Table 2 2030年におけるGTの容量別開発性能目標

項 目	単位	大型GT		中型GT		小型GT*3		(参考)航空転用GT	(参考)揚水発電
		現状	2030年目標	現状	2030年目標	現状	2030年目標	現状	現状
出力規模（想定）	MW	GT:330, GTCC:500		GT:100, GTCC:150		7	10	100以下	～470
①起動時間									
GT（0rpm⇒定格負荷）	分	30	5	25	5	14	4.5	2	7
②負荷変化率*1									
GT	%/分	10	50	10	50	14	50	200	50
GTCC	%/分	5	20						
③効率（LHV規準）									
定格時	%	62	63	55	58	33	36	53	
50%負荷時	%	55	56	48	52	26	28	50	
④最低負荷*2									
一軸式コンバインド	%	45	10	50	10				
多軸式(3on1)コンバインド	%	15	3	10	3				

*1 負荷変化率：運用負荷帯（最低負荷より上）での値

*2 最低負荷：低NO_x燃焼下限で設定

*3 シンプルサイクルとして

であり、最低負荷引き下げへの対応が一軸式より優れる。ここでは、ガスタービン3台と蒸気タービン1台による3on1の構成において、最低負荷を3%まで引き下げることを開発目標とする。一軸式の場合は、コンバインドとしての運用だけでなく低負荷時のガスタービン単独での運用も可能とさせることを念頭に、最低負荷を10%まで引き下げることを開発目標とする。

一方、大型ショッピングセンターやスマートコミュニティ等比較的小さな系統規模では小型ガスタービンを用いたコージェネレーションが適している。地域的な電力需要消費側の変動幅を抑制緩和し、広域系統変動緩和の役割を担うことが期待できる。

5.2 並行して検討が不可欠な施策

技術開発を円滑に進めるとともに、技術の普及を図るためには、単なる技術開発だけではない様々な検討が不可欠である。とりわけ、開発したガスタービンを活用した事業が成立する制度（容量市場等）の整備は重要な課題であり、確実に検討が進むことが望まれる。他にも、系統連系実証を可能とする運転検証特区の設立、国内に限らずアジア地域やアフリカ地域を主市場と捉えた市場の開拓、ガスタービンの運転・保守に対する規制緩和、気象や電力需要の予測技術の高精度化と情報ネットワークの標準化、情報管理と知財取扱いの整理など、様々な立場からの検討が並行して進むことが必要である。

(渡辺和徳)

6. おわりに

「再生可能エネルギー大量導入時代の系統安定化対応先進ガスタービン発電設備の研究開発」の先導研究において、要求される性能と運用条件について検討した。再生可能エネルギーによる発電は、自然条件に大きく影響されることから、発電量に大きな変動が発生するため、電力消費とのバランス対応を基本に据えなければ実際の対応が困難であることが明確になった。将来のCO₂削減社会に向けて、再生可能エネルギーによる発電設備と共存するガスタービン発電設備に対する電力需給バランス面からの要求条件、ならびに実現するための技術課題を踏まえて、基礎研究・要素技術開発・技術実証と、引き続き着実に研究開発を進めていく所存である。

最後に、本研究の推進にあたりご指導ご協力いただきました、NEDOイノベーション推進部のご担当者様、ならびにNEDO技術戦略研究センター、経済産業省産業技術環境局研究開発課、意見交換にに応じていただいた電力会社のご担当者の皆さまに、この場を借りて厚くお礼申し上げます。

引用文献

- (1) 経済産業省 長期エネルギー需給見通し, (2015), <http://www.meti.go.jp/press/2015/07/20150716004/20150716004_2.pdf> (参照日 2016年9月21日).
- (2) 総合資源エネルギー調査会 長期エネルギー需給見通し小委員会 (第4回会合) 資料3 再生可能エネルギー各電源の導入動向について (資源エネルギー庁, 平成27年3月).
- (3) 原子力・エネルギー集2015, 電気事業連合会 (2015).
- (4) 片岡和人 他, 電気学会新エネルギー・環境メタボリズム社会・環境システム合同研究会, FTE-12-052, MES-12-023 (2012).
- (5) 高橋徹, 中本政志, 渡邊泰, 火力発電システム動特性解析ツールの構築, 電力中央研究所報告, M15005 (2016).
- (6) IEA, World Energy Outlook 2015 (2015).
- (7) IEA, Energy Technology Perspective 2014 (2014).
- (8) Akhil, A. A., Huff, G., Currier, A. B., Kaun, B. C. and Rastler, D. M., DOE/EPRI 2013 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA, SAND2013-5131 (2013).
- (9) 蒲生秀典, 再生可能エネルギー利用拡大のためのエネルギーストレージの研究開発動向, 科学技術動向, No. 143 (2014).
- (10) IEA, Projected Cost of Generating Electricity (2015).
- (11) HyGrid研究会, 水素を活用したハイブリッドグリッド (HyGrid) の展開の可能性 ~ 地方からの日本の活性化のために ~ 将来の水素エネルギーの最大活用をめざして ~, 経済産業省水素・燃料電池戦略協議会ワーキンググループ第6回配付資料 (2014).
- (12) 三菱重工業 本社営業窓口 風水力・一般機械部パイプライン圧縮機, パイプライン圧縮機, 三菱重工技報, Vol. 41, No. 3 (2004), p. 181.
- (13) 東京ガス, プレスリリース/南富士幹線の建設着工について, (2014), <<http://www.tokyo-gas.co.jp/Press/20040520-1.html>> (参照日 2016年9月21日).
- (14) 東京ガス, プレスリリース/幹線パイプライン「木更津臨海ラインⅡ期」の建設工事完了について, (2014), <<http://www.tokyo-gas.co.jp/Press/20141128-01.html>> (参照日 2016年9月21日).
- (15) 東京ガス, プレスリリース/幹線パイプライン「埼東幹線」の建設工事完了について, (2015), <<http://www.tokyo-gas.co.jp/Press/20151016-01.html>> (参照日 2016年9月21日).
- (16) 静岡ガス, ニュースリリース/静岡-浜松間のパイプライン「静浜幹線」の全線供用開始について, (2015), <<https://www.shizuokagas.co.jp/information/news/2015/1001.html/>> (参照日 2016年9月21日).
- (17) 西部ガス, ニュースリリース/輸送幹線「九州北部幹線」の建設について, (2013), <<http://www.saibugas.co.jp/info/kouhou/htmls/nr833.htm>> (参照日 2016年9月21日).
- (18) 長谷川徹, 広域アセアン天然ガスパイプライン網構想—その概要・課題・メリットの検証—, 石油/天然ガスレビュー' 01・7 (2001), pp. 12-32.
- (19) 竹原美佳, 中国の天然ガスパイプライン整備の現状と計画, JOGMEC (2013).

- (20) Morii, Y., Terashima, H., Koshi, M., Shimizu, T. and Shima, E., "Fast and robust time integration method for stiff chemical kinetic ODEs", 50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, AIAA (2014), 2014-3920.
- (21) KUCRS -Knowledge-basing Utilities for Complex Reaction Systems-, KUCRS って? <<http://www.frad.t.u-tokyo.ac.jp/~miyoshi/KUCRS/>> (参照日 2016年9月21日).
- (22) Lu, T. and Law, C. K., A Directed Relation Graph Method for Mechanism Reduction, Proceedings of the Combustion Institute, 30 (1) (2005), pp.1333-1341.
- (23) Baba, Y. and Kurose, R., "Flamelet Characteristics of Gaseous and Spray Lifted Flames on Two-dimensional Direct Numerical Simulations", J. Fluid Sci. and Technol., Vol. 3 (2008), pp.846-856.
- (24) Baba, Y. and Kurose, R., "Analysis and Flamelet Modeling for Spray Combustion", J. Fluid Mech., Vol. 612 (2008), pp.45-79.
- (25) John, C. The Case for Flexible Embedded Power Generation, idgtE Conference Paper1, (2015), pp. 1-24.
- (26) Hino, N., Kothet, A., and Kusumi, N., A New Concept of Gas Turbine System; Motor-Assisted Gas Turbine with High-Speed Motor, IEEE Energy Conversion Congress and Expo (2014).
- (27) Sustainable FERC Project, ISO RTO Operationg Regions <<http://sustainableferc.org/iso-rto-operating-regions/>> (参照日 2016年9月21日).
- (28) LM6000 GT Market Trends, Axford Turbine Consultants LLC (2015).
- (29) NEDO, 日照量データベース閲覧システム <<http://app0.infoc.nedo.go.jp/>> (参照日 2016年9月21日).
- (30) 菱川善博, 太陽光発電研究センターの概要と戦略について/評価・システムチームの概要, 第3回 太陽光発電研究センター 成果報告会資料 (2007), p. 3, 産業技術総合研究所.
- (31) NEDO, 局所風況マップ <<http://app8.infoc.nedo.go.jp/>> (参照日 2016年9月21日).
- (32) 公益社団法人日本電気技術者協会ウェブサイト <<http://www.jeeaa.or.jp/>> (参照日 2016年9月21日).
- (33) 資源エネルギー庁, 夏期最大電力使用日の需要構造推計 (東京電力管内), (2011).
- (34) 総務省統計局, 平成27年度 国勢調査 人口速報集計, (2016).
- (35) Bernstein, H. L., Grant, T. S., McClung, R. C. and Allen, J. M., Prediction of Thermal-Mechanical Fatigue Life for Gas Turbine Blades in Electric Power Generation, ASTM Special Technical Publication, ASTM STP 1186 (1993), pp. 212-238.
- (36) Ford, D. A. and Arthey, R. P., Superalloys 1984, Ed. by M. Gell et al., (1984), 115.
- (37) United States Patent 6,905,559 B2 (2005).
- (38) United States Patent 5,399,313 (1995).
- (39) Schafrik, R. E., Accelerated Materials and Process Development, ISABE-2009-1167 (2009).
- (40) Kawagishi, K., Zhu, R., Yokokawa, T., Kobayashi, T., Koizumi, Y., Yuyama, M. and Harada, H., Proceedings: 10th Liege Conference: Materials for Advanced Power Engineering 2014, ed. by Jacqueline Lecomte-Beckers, et al.,Forschungszentrum Julich GmbH, University of Liege and Cranfield University (2014), pp. 532-537.
- (41) United States Patent 4,719,080 (1988).
- (42) UK Patent GB 2235697 A (1991).
- (43) Second Generation Single Crystal Superalloy, National Institute for Materials Science (NIMS) <<http://sakimori.nims.go.jp/catalog/TMS-82+Catalogue-rev1.pdf>> (参照日 2016年9月21日).
- (44) United States Patent 6,755,921, B2 (2004).
- (45) Walston, S., A. Cetel, A., R. MacKay, R., O' Hara, K., Duhl, D. and Dreshfield, R., Joint Development of Fourth Generation Single Crystal Superalloy, NASA Technical Memorandum, 2004-213062 (2004), <<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20050019231.pdf>> (参照日 2016年9月21日).

第28回ガスタービン教育シンポジウム報告

金澤 直毅

KANAZAWA Naoki

2016年9月8日(木)、9日(金)の2日間にわたり、第28回ガスタービン教育シンポジウムが、兵庫県明石市の川崎重工業明石工場で開催された。今年度は関東地区、関西地区それぞれで開催される年に当たり、関東地区では7月にIHI昭島事業所とIHI瑞穂工場で開催された。そのため、関東地区からの参加者は少なかったが、それでも最終的に57名(学生7名、社会人50名)の方に参加頂いた。

この教育シンポジウムでは主に学生や若手技術者などガスタービン初学者を対象に、ガスタービンの基礎知識を学んで頂く目的で、第一線で活躍されている各専門家による講義と、実際のガスタービンとその関連の製造及び研究開発施設等の見学を併せた企画である。今回も、1日目に講義2テーマと特別講義及び川崎重工業明石工場の生産設備・試験設備見学と総合事務所プロダクトコーナーの見学会を実施し、2日目に講義4テーマを実施した。

1日目は、集会行事委員会の輪嶋委員長による開会挨拶の後、2テーマの講義と特別講義、(1)ガスタービン概論(石坂浩一氏)、(2)ガスタービンと流体力学(坂元康朗氏)、(3)川崎重工業におけるガスタービンの開発(武浩司氏)が行われた。その後、官学参加者は明石工場内の発電用ガスタービンの組立・分解工場と出荷試験工場を中心に生産設備と試験設備の見学を行い、参加者は各工程の説明に聞き入っていた。企業参加者は、モーターサイクルの組立・試験工場を見学した後、総合事務所プロダクトコーナーを見学した。総合事務所プロダクトコーナーには、実際にボーイング787に搭載し商用運行されたTrent1000エンジンや発電用ガスタービンのカットモデルが展示されていた。

設備見学終了後、明石工場内にある西食堂で懇親会が開催された。懇親会にはシンポジウム参加者の約8割の

方が参加し、会場各所で参加者同士の官学及び企業間の枠を超えた活発な議論と相互交流がなされ、参加者の方に有意義な時間と場所を提供できたと思う。

2日目は、前日に引き続きガスタービン関連の4テーマの講義、(4)ガスタービンと伝熱工学(都留智子氏)、(5)ガスタービンと燃焼工学(小田剛生氏)、(6)ガスタービンと材料工学(上村好古氏)、(7)ガスタービンと制御工学(佐藤毅氏)が行われた。それぞれの講義はガスタービンの基礎から最新の技術動向までを専門家の立場から説明がなされ、受講者にとって今後の仕事・研究などを進めるうえで大いに役立つ内容の濃い講義となっており、熱心な聴講・質疑応答が行われた。

全講義終了後、2日間の講義に参加した参加者全員に修了の証として受講証が手渡された。また、参加者には、今後の教育シンポジウムの運営及び教材に関するアンケートにご協力頂いた。アンケート結果は次回以降の企画及び教材の改定に反映する予定である。

本シンポジウムでは2013年に出版された「ガスタービン工学」を教材として用いており、その執筆者の先生方を中心に講師をお願いしている。「ガスタービン工学」は学会ホームページから購入することができ、今回の参加者のうち事前に教材を購入し受講していた方もいた。講義では時間の都合もあり、教材の一部しか扱うことができなかったが、参加された皆様にはこの教材を有効に活用し、ガスタービンの知識をさらに深めるのに役立てて頂ければ幸いである。

最後に、講義、資料等の作成・準備にご尽力して頂いた講師の先生方々に感謝すると共に、会場の提供、見学会及び懇親会についてご協力頂いた川崎重工業株式会社の関係者各位に深く感謝いたします。

(集会行事委員会委員)



講義風景



懇親会風景

GTSJ ガスタービンセミナー（第45回）のお知らせ

「ガスタービンおよび航空エンジンの最新技術動向」をテーマとして、第45回ガスタービンセミナーを下記の通り開催致します。
学会の会員、非会員を問わず、皆様のご参加をお待ちしております。

- 日 時 : 2017年1月26日(木) 9:50 ~ 17:15 (受付開始 9:20)
1月27日(金) 10:00 ~ 16:30
- 場 所 : 本田技研工業株式会社 和光本社ビル内 1F 会議室
〒351-0188 埼玉県和光市本町8-1
*東武東上線または地下鉄(有楽町線・副都心線)和光市駅下車、徒歩約5分
会場地図は、日本ガスタービン学会ホームページに掲載
- 主 催 : 公益社団法人 日本ガスタービン学会
- 協 賛 : エネルギー・資源学会、可視化情報学会、火力原子力発電技術協会、計測自動制御学会、自動車技術会、
(依頼中) コージェネレーション・エネルギー高度利用センター、スマートプロセス学会、ターボ機械協会、電気学会、
日本液体微粒化学会、日本エネルギー学会、日本ガス協会、日本機械学会、日本金属学会、
日本航空宇宙学会、日本航空技術協会、日本材料学会、日本セラミックス協会、日本鉄鋼協会、
日本伝熱学会、日本トライボロジー学会、日本内燃機関連合会、日本内燃力発電設備協会、日本燃焼学会、
日本非破壊検査協会、日本品質管理学会、日本複合材料学会、日本マリンエンジニアリング学会、
日本流体力学会、腐食防食学会、溶接学会
- セミナープログラム テーマ:「ガスタービンおよび航空エンジンの最新技術動向」

第1日目【1月26日(木)】

※講演時間には質疑応答の時間を含む

「セッションⅠ：航空エンジンの最新技術動向と材料技術」			
1	9:50-10:50	航空機エンジン技術の研究開発動向	東京大学 渡辺 紀徳 氏
2	10:50-11:50	防衛装備庁における次世代エンジン研究について	防衛装備庁 佐久間 俊一 氏
3	13:00-14:00	航空機エンジンにおける複合材適用技術動向	(国研)宇宙航空研究開発機構 北條 正弘 氏
4	14:00-15:00	HF120 ターボファンエンジンのCFRP製静翼開発	Honda Aero Inc. 穴蔵 道秀 氏
5	15:15-16:15	航空用エンジン Geared Turbo Fan のパワーギアボックス技術	川崎重工業(株) 赤堀 広文 氏
6	16:15-17:15	航空機エンジンへのCMC適用開発	(株)IHI 中村 武志 氏

第2日目【1月27日(金)】

「セッションⅡ：ガスタービンの高性能化技術と新エンジンシステム」			
7	10:00-11:00	極超音速予冷ターボジェットエンジンの開発研究	早稲田大学 佐藤 哲也 氏
8	11:00-12:00	燃焼数値シミュレーションの最新動向	京都大学 黒瀬 良一 氏
9	13:10-14:10	カーボンフリー燃料アンモニアとアンモニア燃焼ガスタービンの技術開発	(国研)産業技術総合研究所 壹岐 典彦 氏
10	14:10-15:10	超臨界CO ₂ サイクル火力発電用ガスタービンの開発	(株)東芝 新関 良樹 氏
11	15:25-16:25	ガスタービンコンバインド発電におけるICT(情報通信技術)による顧客付加価値向上の取組例	三菱日立パワーシステムズ(株) 今北 浩司 氏

6. セミナーの内容

(1) 「航空機エンジン技術の研究開発動向」

(東京大学 渡辺 紀徳 氏)

民間エンジン国際共同開発や防衛エンジン研究開発など、エンジン開発が近年活発化している。まずこれらの活動の現状をまとめる。今後のエンジン技術の更なる進展には、燃費性能の向上とCO₂削減の推進、騒音・NO_x・粒子状物質削減等の環境対応技術の高度化などが益々重要となる。これらの実現のために実施されている研究開発の動向を俯瞰し、また、電動化や新燃料利用等の未成熟技術も含めた将来技術の研究開発を展望する。

(2) 「防衛装備庁における次世代エンジン研究について」

(防衛装備庁 佐久間 俊一 氏)

防衛装備庁においては昭和20年代末よりジェットエンジンの研究開発を実施しており、中間練習機T-1B用のJ3-3を初めとして固定翼哨戒機P-1用のF7-10まで、6種類のエンジンを開発するとともに、数種類のエンジンを研究試作している。これらの開発あるいは研究試作に当たっては要素レベルの先行的な研究を実施しており、恒常的にエンジンの研究開発を行っている。ここでは、そうした防衛装備庁におけるこれまでの歩みと現在実施している次世代エンジンの研究の状況を紹介する。

(3) 「航空機エンジンにおける複合材適用技術動向」

((国研) 宇宙航空研究開発機構 北條 正弘 氏)

航空機開発においては、さらなる燃料消費量の削減を目指して、さまざまな技術開発が行われている。中でも、航空機の軽量化は重要な課題のひとつとなっており、航空機エンジンにおいては複合材の適用による軽量化技術開発が行われてきた。複合材の性能・信頼性向上によって、今後もさらに適用範囲は拡大していくと考えられる。本講演では、航空機エンジンにおける複合材の適用事例や最新の技術動向について紹介する。また、JAXAで実施している複合材適用によるエンジン軽量化に関する研究開発例についても紹介する。

(4) 「HF120ターボファンエンジンのCFRP製静翼開発」

(Honda Aero Inc. 穴蔵 道秀 氏)

GE Honda HF120エンジンでは、軽量化の一環として、静翼とシュラウドを一体化したCFRP製ファンアウトレットガイドペーンを採用した。エンジン部品への適用にあたり、短繊維ランダム配向CFRPのFAA材料認定を取得し、成形時間の短縮化等、量産に向けた製造プロセスの課題をクリアした後、単体での衝撃試験・疲労試験での耐空性評価を経て、製品への適用を果たした。本講演では、HF120へのCFRP製静翼適用の概要を紹介する。

(5) 「航空用エンジン Geared Turbo Fan のパワーギアボックス技術」

(川崎重工業(株) 赤堀 広文 氏)

Pratt&Whitney社のGeared Turbo Fan (GTF) エンジンは、低圧タービンの出力をギアボックスで減速して従来より大きなファンを駆動し、バイパス比を増加させて低燃費を実現している。このGTFエンジンを含め航空用エンジンに使用されるパワーギアボックスの技術的特徴について解説し、その基本要素である歯車の設計や製造について説明する。さらに将来のパワーギアボックス技術の課題について議論する。

(6) 「航空機エンジンへのCMC適用開発」

((株) IHI 中村 武志 氏)

環境問題への対応や原油価格の値上がりに対するリスク回避のため、燃費の良い航空機エンジンが近年特に求められており、軽量で耐熱性のある新しい材料が望まれている。現在主流の耐熱材料であるNi合金は既に耐熱限界に近い温度で運用されており、今後飛躍的な耐熱温度の向上は難しい。その代替材としてセラミックスの軽さと耐熱性を活かし、欠点である脆さを克服したセラミックス基複合材料 (Ceramic Matrix Composites) が開発されている。CMCは20年以上の研究を経て本格的な実用化の時期に近づいており、材料・部品の開発動向を、IHIにおける事例を中心に紹介する。

(7) 「極超音速予冷ターボジェットエンジンの開発研究」

(早稲田大学 佐藤 哲也 氏)

JAXAでは、次世代の極超音速航空機および宇宙往還機に搭載する予冷ターボジェットエンジンの研究開発を進めている。当エンジンは、液体水素燃料を冷媒とした空気予冷器の導入により、ターボジェットの飛行速度限界を従来のマッハ3.5から6まで拡大するとともに、サイクル熱効率を向上させようとするものである。本セミナーでは、これまでの開発研究 (システム燃焼実験、要素研究) の内容および飛行試験を見据えた将来構想について紹介する。

(8) 「燃焼数値シミュレーションの最新動向」

(京都大学 黒瀬 良一 氏)

燃焼数値シミュレーション手法の基礎について解説する。また、文部科学省「HPCI戦略プログラム (分野4 次世代ものづくり)」および「ポスト「京」で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題に関するアプリケーション開発・研究 (重点課題6 革新的クリーンエネルギーシステムの実用化)」において得られた講演者の最新成果 (実機を対象にした応用研究例や、燃焼振動、火炎伝播およびフラッシュバック等に関する基礎研究例) と、燃焼数値シミュレーションの今後の動向について概説する。

(9) 「カーボンフリー燃料アンモニアとアンモニア燃焼ガスタービンの技術開発」

(国研) 産業技術総合研究所 壹岐 典彦 氏)

アンモニアは水素と同様にカーボンフリー燃料としても利用できる。産総研は東北大学流体科学研究所との共同研究でアンモニア直接燃焼ガスタービン発電の実証試験を行っている。50kW級マイクロガスタービンを灯油とガス燃料の双方で運転できるように改造した。灯油-アンモニア混焼、アンモニア専焼、メタン-アンモニア混焼による発電試験に成功し、高濃度の窒素酸化物が発生するものの、脱硝装置により低く抑えることができることを確認した。さらに燃焼器内を観察できるように改造をして、発電状態でアンモニア燃焼火炎の観察を行った。今後、燃焼器テストリグを用いて燃焼器の改良を進める予定である。

(10) 「超臨界CO₂サイクル火力発電用ガスタービンの開発」

(株) 東芝 新関 良樹 氏)

超臨界CO₂を作動媒体とした発電システムが注目されている。東芝では燃料を酸素燃焼して得られた高温高压のCO₂でタービンを駆動し、発電とCO₂回収を同時に実現できる世界初の高効率発電システムをネットパワー社をはじめとする米国企業3社と共同で開発しており、システムのキーコンポーネントである高温高压タービン・燃焼器の開発を担当している。ここでは、超臨界CO₂サイクル発電システムの特徴と当社の開発状況を紹介する。

(11) 「ガスタービンコンバインド発電におけるICT (情報通信技術) による顧客付加価値向上の取組例」

(三菱日立パワーシステムズ (株) 今北 浩司 氏)

近年のガスタービンコンバインドプラントの高性能化ならびに市場での経済性の追求により、その運転保守も高度化が求められている。その一例として本講演では情報通信技術 (ICT) を活用した運転保守の合理化ならびに最適化を目指した取り組みについて紹介する。より具体的には、プラント運転データの分析診断技術とそれにより得られる洞察に基づいた性能や信頼性の向上、ガスタービン保守プログラムの最適化がいかに実現できるかなどについて述べる。

7. 参加要領

- 1) 参加費 (税込) : ◆主催および協賛団体会員 2日間 27,000円 1日のみ 19,440円
 ◆学生会員 5,400円
 ◆会員外 2日間 37,800円 1日のみ 27,000円
 ◆会員外 (学生) 8,640円
 ◆資料のみ 1冊 5,400円 (残部ある場合)

- 2) 申込方法: 申込書に所属、氏名、加入学協会名、GTSJ 会員は会員番号等必要事項を明記の上、FAX又はE-mailにて下記事務局宛にお送りください。 (申込締切: 2017年1月20日 (金))
 日本ガスタービン学会ホームページからも申込ができます。 (※当日申込みは受付ません。必ず事前にお申込み下さい)

また、参加費につきましては2017年1月25日 (水) までに以下の方法にてお支払い下さい。

支払い期日に間に合わない場合には、事務局までご連絡ください。

- ・郵便振替 00170-9-179578
 - ・銀行振込 みずほ銀行 新宿西口支店 (普) 1812298
 - ・Paypal (クレジットカード決済) ※後日、支払先情報をメールにてお送りします。
- *口座名はいずれも、「シャ) ニホンガスタービンガッカイ」です。

- 3) 昼食について: 26日、27日の昼食用として弁当のご予約をお受けします。ご希望の方は参加申込み時にご予約ください。飲物付で一食800円 (税込) です。 (弁当申込締切: 1月20日 (金))
 ※昼休みの外出時は、セキュリティ上、入出門手続きが必要となりますので、昼食については会場内でお取り頂くことを推奨いたします。

- 4) 事務局: 公益社団法人 日本ガスタービン学会
 〒160-0023 東京都新宿区西新宿7-5-13-402
 Tel. 03-3365-0095 Fax. 03-3365-0387
 URL: <http://www.gtsj.org> E-Mail: gtsj-office@gtsj.org

資料集・ネームカードは当日受付にてお渡しします。

第 45 回ガスタービンセミナー (2017 年 1 月 26、27 日)

参加申込書

日本ガスタービン学会 行 (FAX : 03-3365-0387 / E-mail : gtsj-office@gtsj.org)

会社名	
所在地	〒
TEL	
FAX	

【参加者名】 (所在地・連絡先が所属により異なる場合には、本用紙をコピーして別シートにご記入下さい。)

フリガナ 氏 名	所 属	TEL E-MAIL	所属学協会 GTSJ 会員 No.	参加日 ○印を 付けて下さい	弁当予約* ○印を 付けて下さい
				26・27	26・27
				26・27	26・27
				26・27	26・27
				26・27	26・27

*26日、27日の昼食用として、弁当のご予約をお受けします。ご希望の方は、参加申込み時にご予約ください。
飲物付で1食800円(税込)です。(事前予約のみ受付(1/20締切)) 代金は、当日現金にてお支払ください。

【事務局への連絡事項】

	2日間(税込)	人数	1日のみ(税込)	人数	合計金額
正 会 員	27,000円		19,440円		円
学 生 会 員	5,400円		5,400円		円
会 員 外	37,800円		27,000円		円
会員外(学生)	8,640円		8,640円		円
支払予定日:	月	日	支払金額合計:		円

払込方法 : (○をつけてください。)

1. 銀行振込(みずほ銀行 新宿西口支店 普通 1812298)
 2. 郵便振替(00170-9-179578)
 3. Paypal(クレジットカード決済)※後日、支払先情報をメールにてお送りします
- * 口座名はいずれも、「シャ)ニホンガスタービンガッカイ」

請求書の発行 : 要 (宛名:) ・ 不要

領収証の発行(当日お渡しします) : 要 (宛名:) ・ 不要

○ 本会共催・協賛行事 ○

主催学協会	会合名	共催/協賛	開催日	会場	詳細問合せ先
日本航空宇宙学会	第57回航空原動機・宇宙推進講演会	共催	2017/3/9-10	沖縄県市町村自治会館	http://www.jsass.or.jp/propcom
ISAIF実行委員会	第13回内部流れの実験的・数値的空力熱力学に関する国際シンポジウム (The13th ISAIF)	協賛	2017/5/7-11	沖縄科学技術大学院大学	The 13th ISAIF in Okinawa 実行委員会事務局 (琉球大学工学部), https://mechsys.tec.u-ryukyu.ac.jp/isaif13/



▷ 入 会 者 名 簿 ◁

〔正会員〕

竹本 剛 (IHI)	下村 育生 (川崎重工業)	赤木 優啓 (川崎重工業)
橋本 典純 (先進知財総合研究所)	老田 浩 (先進知財総合研究所)	石亀 啓太 (ダイハツディーゼル)
松野 隆 (鳥取大学)	坂本 数貴 (防衛装備庁)	山田 誠一 (防衛装備庁)
久野 直樹 (本田技術研究所)	末永 陽一 (三菱日立パワーシステムズ)	中木戸 智史 (三菱日立パワーシステムズ)
岡崎 輝幸 (三菱日立パワーシステムズ)		

〔学生会員〕

佐々木 宏和 (岩手大学大学院)	佐藤 遼太 (岩手大学大学院)	岩船 翼 (金沢工業大学)
中村 俊一郎 (関西大学)	細川 俊樹 (関西大学)	齋藤 誠志朗 (九州大学大学院)
水野 佑樹 (高知工科大学)	松岡 銀司 (法政大学大学院)	

次号予告 日本ガスタービン学会誌2017年1月号 (Vol.45 No. 1)

特集「発電用大型ガスタービンの開発動向」

巻頭言 「発電用ガスタービンの開発動向」特集に向けて (仮題) 渡辺 和徳 (電力中央研究所)

タイトル未定 関 真 (日本GE)

発電用次世代ガスタービンの開発 辻 良史 (三菱日立パワーシステムズ)

タイトル未定 大築 康彦 (シーメンス)

特集「第44回定期講演会 (酒田) 特集」

全体報告

第44回日本ガスタービン学会定期講演会 全体報告 (仮題) 西澤 敏雄 (宇宙航空研究開発機構)

論説・解説

動特性解析による急速負荷変化時のプラント影響評価 高橋 徹 (電力中央研究所)

先進ガスタービン燃焼器の開発に向けた燃焼シミュレーションの高度化 丹野 賢二 (電力中央研究所)

急速起動時非定常流れのシミュレーションに向けた実験的・数値解析の取り組み 佐久間 康典 (東京大学)

熱・流体・構造過渡応答連成解析にむけた複雑流路対応型CFDコードの構築 立石 敦 (東京大学)

発電用大型ガスタービンにおける急速起動時圧縮機の非定常流れシミュレーション 荒木 勝人 (三菱日立パワーシステムズ)

発電用大型ガスタービンにおける急速起動時の構造過渡応答シミュレーション 荒木 勝人 高橋 康雄 (三菱日立パワーシステムズ)

※タイトル、執筆者は変更する可能性があります。

訂正

本誌前号 (44巻5号) の記事におきまして、著者から以下の訂正依頼がありました。

44巻5号 (2016年9月)

論説・解説

題目: 高効率V型中速ディーゼル機関の開発と実用化

著者: 加藤 尚次, 元田 徹

訂正内容: 「5. 謝辞」に以下の文章を追加

28AHX-DFには、国土交通省殿の「船舶からのCO₂削減技術開発支援事業」の補助対象事業及び一般財団法人日本海事協会殿との共同研究事業、日本財団殿の助成事業による一般財団法人日本船舶技術研究協会殿との共同研究として採択され支援を受けて開発された要素技術の一部を使用しております。ここに記し謝辞といたします。

2016年度役員名簿

会長 久山 利之 (川崎重工)

副会長 船崎 健一 (岩手大)

法人管理担当執行理事 今成 邦之 (IHI), 太田 有 (早大) (兼務), 木下 康裕 (川崎重工), 安田 聡 (MHPS), 渡辺 紀徳 (東大)

公益目的事業担当執行理事 太田 有 (早大), 小森 豊明 (三菱重工), 西澤 敏雄 (JAXA), 野崎 理 (高知工科大), 藤井 智晴 (電中研), 細川 哲也 (JALエンジニアリング), 山根 秀公 (防衛装備庁), 吉田 英生 (京大), 輪嶋 善彦 (本田), 渡辺 紀徳 (東大) (兼務)

理事 渋谷 直紀 (東芝), 田尻 敬次 (荏原エリオット), 松沼 孝幸 (産総研), 原田 広史 (物材研), 松崎 裕之 (酒田共同火力)

監事 坂田 公夫 (SKYエアロスペース研), 渡辺 康之 (IHI)

2016年度委員名簿 (順不同)

2016年10月7日現在

○は委員長

倫理規定委員会 ○木下 康裕 (川崎重工), 今成 邦之 (IHI), 太田 有 (早大), 西澤 敏雄 (JAXA), 安田 聡 (MHPS)

自己点検委員会 ○木下 康裕 (川崎重工), 今成 邦之 (IHI), 太田 有 (早大), 西澤 敏雄 (JAXA), 安田 聡 (MHPS)

運営委員会 ○今成 邦之 (IHI), 太田 有 (早大), 木下 康裕 (川崎重工), 酒井 義明 (東芝), 塚原 章友 (MHPS), 西澤 敏雄 (JAXA), 原田 純 (川崎重工), 松沼 孝幸 (産総研), 森岡典子 (IHI), 安田 聡 (MHPS), 吉田 英生 (京大), 渡辺 紀徳 (東大)

企画委員会 ○太田 有 (早大), 伊東 正雄 (東芝), 今成 邦之 (IHI), 木下 康裕 (川崎重工), 塚原 章友 (MHPS), 西澤 敏雄 (JAXA), 安田 聡 (MHPS), 吉田 英生 (京大), 輪嶋 善彦 (本田), 渡辺 紀徳 (東大)

国際委員会 ○渡辺 紀徳 (東大), 井上 智博 (東大), 太田 有 (早大), 岡井 敬一 (JAXA), 小森 豊明 (三菱重工), 谷 直樹 (IHI), 葉狩 智子 (川崎重工), 福田 雅文 (高効率発電システム研), 船崎 健一 (岩手大), 松田 寿 (東芝), 三好 市朗 (MHPS), 山根 敬 (JAXA), 山本 誠 (東京理科大)

学術講演会委員会 ○西澤 敏雄 (JAXA), 小熊 英隆 (三菱重工), 酒井 英司 (電中研), 武田 淳一郎 (富士電機), 玉井 亮嗣 (川崎重工), 富永 純一 (東芝), 浜辺 正昭 (IHI), 姫野 武洋 (東大), 平野 孝典 (拓殖大), 藤原 仁志 (JAXA), 堀内 康広 (MHPS), 松沼 孝幸 (産総研), 渡邊 裕章 (九大)

集行事務委員会 ○輪嶋 善彦 (本田), 金澤 直毅 (川崎重工), 木村 武清 (元川崎重工), 澤 徹 (東芝), 瀬川 武彦 (産総研), 手塚 津奈生 (IHI), 西江 俊介 (三井造船), 西村 英彦 (MHPS), 平野 篤 (防衛装備庁), 細川 哲也 (JALエンジニアリング), 泰中 一樹 (電中研), 藤井 達 (日立), 松沼 孝幸 (産総研), 山形 通史 (富士電機), 吉田 征二 (JAXA)

ガスタービン技術普及委員会 ○藤井 智晴 (電中研), 石田 克彦 (川崎重工), 賀澤 順一 (JAXA), 齊藤 大蔵 (東芝), 中村 恵子 (IHI), 花井 直人 (JALエンジニアリング), 檜山 貴志 (三菱重工), 福山 佳孝 (JAXA), 村田 章 (東京農工大), 屋

口 正次 (電中研), 山本 誠 (東京理科大), 横山 喬 (MHPS), 渡辺 紀徳 (東大)

学会誌編集委員会 ○吉田 英生 (京大), 荒木 秀文 (MHPS), 壹岐 典彦 (産総研), 石川 揚介 (東芝GEタービンサービス), 加藤 千幸 (東大), 齋木 正則 (中部電力), 阪井 直人 (川崎重工), 佐藤 哲也 (早大), 渋谷 直紀 (東芝), 杉本 富男 (三井造船), 高橋 俊彦 (電中研), 田尻 敬次 (荏原エリオット), 辻田 星歩 (法政大), 寺澤 秀彰 (東京ガス), 寺本 進 (東大), 中野 賢治 (IHI), 中野 剛 (JALエンジニアリング), 新関 良樹 (東芝), 野崎 理 (高知工科大), 野原 弘康 (ダイハツディーゼル), 原 浩之 (MHPS), 原田 広史 (物質・材料研), 松崎 裕之 (酒田共同火力), 北條 正弘 (JAXA), 山下 一憲 (荏原), 山根 喜三郎 (防衛装備庁), 吉野 展永 (IHI)

論文委員会 ○山根 敬 (JAXA), 青塚 瑞穂 (IHI), 壹岐典彦 (産総研), 小田 剛生 (川崎重工), 柴田 貴範 (MHPS), 田頭 剛 (JAXA), 寺本 進 (東大), 中谷 辰爾 (東大), 姫野武洋 (東大), 山本 武 (JAXA), 山本 誠 (東京理科大), 吉岡洋明 (愛媛大)

ガスタービン統計作成委員会 ○小森 豊明 (三菱重工), 恵比寿 幹 (三菱重工), 坂倉 季彦 (MHPS), 澤 徹 (東芝), 野村 藤樹 (ターボシステムユニティッド), 原田 純 (川崎重工), 宮川 歩 (川崎重工), 山上 舞 (IHI), 山上 展由 (MHPS), 吉田 知彦 (MHPS), 米田 幸人 (ヤンマー)

産官学連携委員会 ○渡辺 紀徳 (東大), 赤城 正弘 (防衛省), 壹岐 典彦 (産総研), 岡崎 正和 (長岡技科大), 金津 和徳 (IHI), 岸部 忠晴 (MHPS), 幸田 栄一 (電中研), 佐々木 隆 (東芝), 武 浩司 (川崎重工), 福泉 靖史 (三菱重工), 藤岡 順三 (物質・材料研), 二村 尚夫 (JAXA), 古川 雅人 (九大), 松崎 裕之 (酒田共同火力), 吉田 英生 (京大)

広報委員会 ○山根 秀公 (防衛装備庁), 荒木 秀文 (MHPS), 酒井 義明 (東芝), 姫野 武洋 (東大), 村田 章 (東京農工大), 山根 敬 (JAXA), 吉田 征二 (JAXA)

表彰委員会 ○船崎 健一 (岩手大), 太田 有 (早大), 木下 康裕 (川崎重工), 児玉 秀和 (IHI), 西澤 敏雄 (JAXA), 野崎 理 (高知工科大), 吉田 英生 (京大)

将来ビジョン検討委員会 ○寺本 進 (東大), 小田 豊 (関西大), 賀澤 順一 (JAXA), 柴田 貴範 (MHPS), 柴田 良輔 (本田), 高橋 徹 (電中研), 仲俣 千由紀 (IHI), 姫野 武洋 (東大), 森澤 優一 (東芝), 山崎 裕之 (東北電力)

女性参画推進委員会 ○仲俣 千由紀 (IHI), 猪亦 麻子 (東芝), 川岸 京子 (物質・材料研), 葉狩 智子 (川崎重工), 森川朋子 (MHPS)

ACGT2016実行委員会 ○山根 敬 (JAXA), 仲俣 千由紀 (IHI), 葉狩 智子 (川崎重工), 松田 寿 (東芝), 三好 市朗 (MHPS)

調査研究委員会 ○壹岐 典彦 (産総研), 伊藤 栄作 (三菱重工), 岡崎 正和 (長岡技科大), 笥 幸次 (首都大), 岸部 忠晴 (MHPS), 黒瀬 良一 (京大), 合田 真琴 (川崎重工), 齊藤 大蔵 (東芝), 高橋 徹 (電中研), 寺島 洋史 (北大), 原田 広史 (物質・材料研), 松沼 孝幸 (産総研), 米澤 克夫 (IHI), 渡辺 和徳 (電中研), 渡辺 紀徳 (東大)

IGTC2019準備委員会委員 ○西澤 敏雄 (JAXA), 太田 有 (早大), 渋谷 直紀 (東芝), 寺本 進 (東大), 仲俣 千由紀 (IHI), 安田 聡 (MHPS), 山根 敬 (JAXA)

日本ガスタービン学会入会のご案内

日本ガスタービン学会は、「エネルギー」をいかにして効率よく運用し、地球規模の環境要請に応えるかを、ガスタービンおよびエネルギー関連分野において追求する産学官民連携のコミュニティです。

会員の皆様からは、「ガスタービン学会に入会してよかったと思えること」の具体例として次の様な声が寄せられています：

- タテ（世代）とヨコ（大学，研究機関，産業界）の交流・人脈が広がった。
- 学会誌が充実しており，学会・業界・国外の専門分野の研究動向や技術情報が効率的に得られた。
- ガスタービンに熱い思いを持った人達と，家族的雰囲気ですら階層を意識せず自由な議論ができ，専門家の指導を得られた。

学会の概要（2016年3月現在）

会員数：2,005名（正会員 1,956名，学生会員 49名） 賛助会員：107社

会員の出身母体数：企業・研究機関・官公庁等 約300，学校 約100

会員のメリット

個人会員（正・学生会員）：

学会誌無料配布（年6回），学術講演会の論文発表・学会誌への投稿資格，本会主催の行事の参加資格と会員参加費の特典，本会刊行物の購入資格と会員価格の特典，調査研究委員会等への参加賛助会員：

学会誌の無料配布，学会誌広告・会告掲載（有料），新製品・新設備紹介欄への投稿，本会主催行事参加および出版物購入について個人会員と同等の特典

入会金と会費

会員別	入会金	会費（年額）	後期入会時 会費（初年度のみ）
正 会 員	500円	8,000円	4,000円
正 会 員（65才以上※）	500円	5,000円	2,500円
学生会員	500円	2,500円	1,250円
賛助会員	1,000円	一口 70,000円とし，一口以上	一口 35,000円

※当該年度3月1日現在

後期・・・9月1日～翌2月末まで

入会方法

学会ホームページにて入会手続きができます（<http://www.gtsj.org/index.html>）。

学会事務局にお電話いただいても結構です。申込書を送付致します。



公益社団法人

日本ガスタービン学会

Gas Turbine Society of Japan

〒160-0023 東京都新宿区西新宿7-5-13 第3工新ビル402

電話番号：03-3365-0095

E-mail: gtsj-office@gtsj.org

編集 後記

10月下旬の酒田での定期講演会を終えるとともに急に冷え込み、秋も一気に深まった感じですが、会員の皆様にはいかがお過ごしでしょうか。お手元に学会誌11月号をお届けいたします。

ご覧になってお気付きのように、本号から、巻頭言、論説・解説、喫茶室についてもご執筆者のお写真を掲載させて頂くことになり（著者のご意向により掲載しないことも可能）、「お顔の見える学会誌」に進化しました。これは、吉田委員長の発案により編集委員会で検討の結果、善は急げと実行に移したのですが、皆様のご感想は如何でしょうか。

さて、本号では「大型プロジェクトに学ぶ」という少し趣向を変えた特集を組ませて頂きました。川口先生が巻頭言でご紹介下さいましたように、FJRエンジンプロジェクトやムーンライト高効率ガスタービンプロジェクトなどに代表される大型プロジェクトを第一線でご担当された諸先輩方において、当時の研究開発を振り返ってご紹介いただくとともに、貴重なご経験をもとに航空機エンジンや発電タービン関連の技術と産業の将来へのメッセージを頂戴しようという企画です。

半世紀近くも前のプロジェクトについて執筆をお引き受け頂けるかどうか不安でしたが、幸い、諸先輩方には執筆をご快諾頂き、FJR、ムーンライトに加えて、WE-NET、蒸気タービン初号機、高性能結晶制御合金など、多くの研究開発プロジェクトをご紹介頂くことができました。同じプロジェクトも、企業、研究所など、それぞれの立場によって異なる視点からご紹介頂いたことで、プロジェクトの実情や波及効果などがより立体的に見えてきたように思います。年月を経た今だから書ける内容も是非とお願い致しました。当時の資料を紐解き、研究開発現場の息吹の感じられる文章にて将来への貴重な

メッセージを下さいましたご執筆者の皆様に、改めて御礼を申し上げます。

日々たゆまぬ進歩の要求される経済社会ですが、時として過去を振り返り、長い時間軸で技術、産業の発展の過程を再確認することにより、逆に遠い将来を予見しこれに備えることも可能になろうかと思われま。本特集号に寄せられた諸先輩からのメッセージが会員の皆様の新規プロジェクト立案や、経営戦略策定などのご参考となり、ガスタービン関連技術及び産業の発展にお役に立つことを心より願っております。

（原田広史）

- 11月号アソシエイトエディター
原田 広史（物質・材料研究機構）
- 11月号担当委員
加藤 千幸（東京大学）
寺澤 秀彰（東京ガス）
中野 賢治（IHI）
中野 剛（JALエンジニアリング）

（表紙写真）

今回の表紙については、【論説・解説】の著者より流用およびお借りしています。

詳細については、下記記事をご参照ください。

- ・「航空宇宙技術研究所におけるFJR710エンジンの研究開発とSTOL実験機での搭載運用」……（P.446～451）
- ・「高効率ガスタービンプロジェクトと航技研における研究開発」……………（P.459～463）
- ・「産業界から見たムーンライト計画の歴史的意義と反省」……………（P.464～470）

だより

✪事務局✪

日に日に寒さが増し、お鍋やおでんなどの温かい食べ物が美味しく感じられる季節になりました。故郷の山梨では、冬の食卓の温かい食べ物と言えば、「ほうとう」です。東京のスーパーではなかなか見かけないのが残念ですが、この時期地元のスーパーではどこでも何種類かの生ほうとう麺がたくさん並んでいます。麺と好みの野菜と一緒にだし汁で煮込み、お味噌で味付けするだけなのですが、それぞれの「家庭の味」がよく表れる郷土料理です。ちなみに我が家では、ほうとうの具の王道であるカボチャは入れません。

さて、今年も残すところあと1か月余りとなってしまいました。仕事でもプライベートでも年内にこれだけはやっておきたいと思うことが皆様にも色々あるのではないのでしょうか。事務局では年内に事務机を1台増設す

るべく、そのスペース確保に向けて、約1名のスタッフが断捨離の捨と離に励んでいます。以前に比べ随分とすっきりして来たとは思っていますが、ちょっと気を緩めるとせっかく片づいた棚や作業机の上がまた色々なものでいっぱいになってしまい、行きつ戻りつを繰り返しています。職場環境の整理整頓は探し物の時間を減らし、仕事の効率を高めると言われていますよね。なんとか今年中には終わらせ、きれいに整頓された職場で新しい年を迎えられるよう、今後はスタッフ皆で力を合わせて頑張りたいと思います。

最後に、今月号の会告にも掲載しておりますが、第45回ガスタービンセミナーが例年通り1月下旬に開催されます。多くの皆様のご参加を心よりお待ちしております。

（山本由香）

学会誌編集および発行要領（抜粋）

2015年4月23日改定

1. 本会誌の原稿はつぎの3区分とする。
 - A. 依頼原稿：学会誌編集委員会（以下、編集委員会）がテーマを定めて特定の人に執筆を依頼する原稿。執筆者は本学会会員（以下、会員）外でもよい。
 - B. 投稿原稿：会員から自由に随時投稿される原稿。執筆者は会員に限る。
 - C. 学会原稿：本学会の運営・活動に関する記事（報告、会告等）および会員による調査・研究活動の成果等の報告。
2. 依頼原稿および投稿原稿は、論説・解説、講義、技術論文、速報（研究速報、技術速報）、寄書（研究だより、見聞記、新製品・新設備紹介）、随筆、書評、情報欄記事の掲載欄に掲載することとし、刷り上がりページ数は原則として以下のとおりとする。

論説・解説、講義	6ページ以内
技術論文	技術論文投稿要領による
速報	4ページ以内
寄書、随筆	3ページ以内
書評	1ページ以内
情報欄記事	1/2ページ以内
3. 依頼原稿の執筆者は、本会誌の原稿執筆要領に従って原稿を執筆し、編集委員会事務局（以下、編集事務局）まで原稿を提出する。編集事務局の所在は付記1に示す。
4. 依頼原稿は、編集委員会の担当委員が、原稿の構成、理解の容易さ等の観点および図表や引用文献の書式の観点から査読を行う。編集事務局は査読結果に基づいて、執筆者への照会、修正依頼を行う。
5. 投稿原稿のうち技術論文以外のものは、編集委員会が審査し、本会誌への掲載可否を決定する。
6. 投稿原稿のうち技術論文の審査、掲載については、技術論文投稿要領に従う。
7. 依頼原稿の執筆者には、本学会の事務局（学会事務局）から原則として謝礼（図書カード）を贈呈する。
8. 依頼原稿および投稿原稿の執筆者には、抜刷を10部贈呈する。
9. 本会誌に掲載された著作物の著作権は原則として本学会に帰属する。本学会での著作権の取扱いについては別途定める著作権規程による。
10. 他者論文から引用を行う場合、本会誌に掲載するために必要な事務処理及び費用分担は著者に負うところとする。

付記1 原稿提出先および原稿執筆要領請求先（編集事務局）
ニッセイエブプロ(株) 企画制作部
学会誌担当：高橋 邦和
〒105-0004 東京都港区新橋5-20-4
TEL：03-5733-5158
FAX：03-5733-5167
E-mail：eblo_h3@eblo.co.jp

技術論文投稿要領（抜粋）

2015年3月10日制定

1. 本学会誌に技術論文として投稿する原稿は次の条件を満たすものであること。
 - 1) 主たる著者は本学会会員であること。
 - 2) ガスタービン及びエネルギー関連技術に関連するものであること。
 - 3) 原稿執筆要領に従って執筆された、モノクロの日本語原稿であること。
 - 4) 一般に公表されている刊行物に未投稿であること。ただし、以下に掲載されたものは未投稿と認め技術論文に投稿することができる。
 - ・本学会主催の学術講演会・国際会議のプロシーディングス
 - ・特許および実用新案の公報、科学研究費補助金等にかかわる成果報告書
 - ・他学協会の講演要旨前刷、社内報・技報、官公庁の紀要等の要旨または抄録
2. 原則として刷り上がり8ページ以内とする。ただし、1ページにつき16,000円の著者負担で4ページ以内の増ページをすることができる。
3. 著者がカラー1ページあたり50,000円を負担する場合には、カラー印刷とすることができる。
4. 投稿者は、原稿執筆要領に従って作成された印刷原稿または原稿電子データを、所定の論文表紙および英文アブストラクトとともに学会誌編集事務局に提出する。
5. 投稿された論文は、論文査読に関する内規に従って査読を行い、論文委員会が掲載可否を決定する。
6. 論文内容についての責任は、すべて著者が負う。
7. 本技術論文の著作権に関しては、学会誌編集および発行要領（抜粋）9.および10.を適用する。

日本ガスタービン学会誌

Vol.44 No.6 2016.11

発行日 2016年11月18日

発行所 公益社団法人日本ガスタービン学会

編集者 吉田 英生

発行者 久山 利之

〒160-0023 東京都新宿区西新宿7-5-13

第3工新ビル402

Tel. 03-3365-0095 Fax. 03-3365-0387

郵便振替 00170-9-179578

銀行振込 みずほ銀行 新宿西口支店

(普) 1703707

印刷所 ニッセイエブプロ(株)

〒105-0004 東京都港区新橋5-20-4

Tel. 03-5733-5158 Fax. 03-5733-5167

©2016, 公益社団法人日本ガスタービン学会

複写をご希望の方へ

本学会は、本誌掲載著作物の複写に関する権利を一般社団法人学術著作権協会に委託しております。

本誌に掲載された著作物の複写をご希望の方は、一般社団法人学術著作権協会より許諾を受けて下さい。但し、企業等法人による社内利用目的の複写については、当該企業等法人が公益社団法人日本複写権センター（一般社団法人学術著作権協会が社内利用目的複写に関する権利を再委託している団体）と包括複写許諾契約を締結している場合にあっては、その必要はございません（社外頒布目的の複写については、許諾が必要です）。

権利委託先 一般社団法人 学術著作権協会

〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル3F
FAX：03-3457-5619 E-mail：info@jaacc.jp

複写以外の許諾（著作物の引用、転載、翻訳等）に関しては、(社)学術著作権協会に委託致していません。直接、本学会へお問い合わせください。